

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

GENÈSE ET ORGANISATION INTERNE DES BRÈCHES DE QUEYLUS,
CHIBOUGAMAU.

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR

RENAN FURIC

MAI 2006

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

AVANT PROPOS

Cette étude a été menée dans le cadre du projet Divex « modélisation des brèches minéralisées » qui a pour but de mieux comprendre la formation des corps bréchiques. L'étude des brèches de Queylus avait pour but de caractériser l'organisation interne (granulométrie, fabrique et géométrie des fragments) d'un corps bréchique considéré comme un breccia-pipe. Le site de Queylus présente l'avantage d'être facilement accessible et de se situer dans une zone relativement bien connue du point de vue géologique. De plus ce gîte a été récemment reconnu par la compagnie Loubel qui nous a donné accès à ses données.

Pour mener à bien cette étude, deux missions de terrain ont été nécessaires pour cartographier en détail les affleurements et effectuer un échantillonnage représentatif. Le travail de laboratoire s'est principalement composé du traitement des clichés réalisés lors de la phase de cartographie afin de pouvoir mettre en relief les caractères particuliers des brèches de Queylus. Cette phase d'analyse d'image s'est accompagnée de travaux de pétrographie notamment de mise en évidence du patron d'altération présent à Queylus.

Ce mémoire a été conçu comme un article. Après traduction et quelques modifications mineures, il sera soumis à une revue avec un comité de lecture, probablement Precambrian Research. Ceci explique sa présentation différente de celles classiquement adoptées pour les mémoires à l'UQAM.

Je remercie Michel Jébrak pour son soutien tout au long de ce travail et ses conseils avisés. Je tiens aussi à remercier Divex pour son appui financier et Marie Auclair, coordinatrice de recherche Divex. Je désire aussi remercier la compagnie Loubel détentrice des droits miniers dans le secteur de Queylus pour m'avoir donné un libre accès à ses données. Je remercie également Christian Beaulieu, Benjamin Jébrak et Jean François Drolet, étudiants à l'UQAM, pour leur aide lors des missions de terrain. Enfin je remercie Michèle Laithier pour ses conseils et son aide dans la réalisation des figures.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT PROPOS.....	ii
TABLE DES MATIÈRES.....	iii
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
RÉSUMÉ.....	vii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I GÉOLOGIE LOCALE.....	4
CHAPITRE II GÉOLOGIE DES BRÈCHES.....	7
2.1 Les fragments.....	9
2.2 La matrice.....	10
CHAPITRE III LES VEINES.....	15
3.1 Les veines pré-bréchification.....	15
3.2 Les veines syn bréchification.....	16
3.3 Les veines post bréchification.....	16
CHAPITRE IV ALTÉRATIONS	18
4.1 Altération phyllique	18
4.2 Altération à hématite.....	20
4.3 Altération propylitique.....	20
4.4Altération à carbonates.....	21
4.5 Altération à Goethite.....	22
CHAPITRE V ORGANISATION INTERNE DES BRÈCHES.....	23
5.1 Faciès non classé.....	25
5.2 Faciès classé.....	28
5.2.1 Faciès à poches.....	28
5.2.2 Laminations.....	29

CHAPITRE VI	
GENÈSE DES BRÈCHES DE QUEYLUS	34
6.1 Relations spatiales.....	34
6.2 Relations temporelles.....	36
6.3 Modèle génétique de la brèche.....	38
CONCLUSIONS.....	41
RÉFÉRENCES	42
ANNEXE 1	
Méthodologie fractale.....	46
ANNEXE 2	
Résultats granulométriques.....	58
ANNEXE 3	
Données des fabriques	51

LISTE DES FIGURES

Figure	
1	Carte de localisation du district de Chibougamau au sein de la province du Supérieur.....2
1.1	Carte géologique simplifiée du Sud du district de Chibougamau.....5
1.2	Lever magnétique du secteur de Queylus.....6
2.1	Clichés et schémas de la brèche Sud.....8
2.2	Diagrammes géochimiques des échantillons de Queylus.....11
2.3	Comparaisons géochimiques des fragments tonalitiques avec l'encaissant et la matrice.....12
4.1	Paragenèse des brèches de Queylus.....19
5.1	Distribution granulométrique des fragments sur l'affleurement de la brèche Nord24
5.2	Graphiques de distributions granulométriques des fragments sur l'affleurement de la brèche Nord26
5.3	Carte des fabriques de la brèche Nord.....27
5.4	Distributions des dimensions fractales de bordures.....31
5.5	Comparaison des distribution granulométriques moyennes des zones classées et non classées de la brèche Nord.....32
5.6	Planche photographique montrant les laminations de la matrice observées sur la brèche Nord.....33
6.1	Schéma de la mise en place des brèches de Queylus.....35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Analyses multi élémentaires des différents composants de la brèche de Queylus.....	21
Tableau 3.1 : Tableau synthétique des orientations des différentes familles de veines.....	23
Tableau 4.1 : Résultats des calculs de températures de cristallisation des chlorites.....	28

RÉSUMÉ

Les gisements cuprifères du district de Chibougamau sont ceux dont les teneurs en cuivre sont les plus élevées d'Abitibi. Ces gisements sont spatialement et génétiquement reliés au pluton de Chibougamau. Ce massif granitique calco-alcalin est polyphasé et intrusif dans le complexe mafique lité du lac Doré. Il est daté à 2718 \pm 2Ma et correspond au second cycle volcanique de la zone Nord de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi.

Les minéralisations cuprifères de Chibougamau sont inusuelles. Elles se présentent comme des veines de sulfures massifs à semi-massifs encaissées dans le Complexe du Lac Doré ou comme des brèches dans les phases tonalitiques du pluton de Chibougamau. La brèche de Queylus se situe au sud du pluton de Chibougamau. Elle est composée de fragments du pluton de Chibougamau emballés dans une matrice riche en poussière de roche et cimenté par de la tourmaline. Deux phases majeures d'altérations sont identifiables. La première, anté bréchification, est clairement de type phyllique avec un assemblage minéralogique à séricite, pyrite et quartz alors que la seconde, synchrone à la bréchification est de type propylitique. L'altération propylitique de la brèche de Queylus se caractérise par : tourmaline, magnétite, albite, titanite, chlorite et allanite.

La brèche Nord de Queylus se caractérise par son organisation interne particulière. Une cartographie de détail suivant un maillage métrique a permis de mettre en évidence la présence de deux zones : l'une où les fragments ne sont pas triés et une seconde où les fragments sont triés suivant leurs tailles et forment des poches. Une seconde brèche, au sud, présente le même type d'altération et de composition mais aucun tri granulométrique n'est présent. La brèche sud montre clairement son initiation par des fractures se développant dans une zone en transtension.

Des comparaisons granulométrique, de fabrique et de géométrie des fragments ont été menées sur les deux zones (classée et non classée). Les résultats montrent que ces deux zones ont été générées simultanément et transportées par fluidisation. Cependant la zone non classée a été transportée dans un régime fluidisé tandis que le classement des fragments visible dans la zone classée a eu lieu lors d'un transport dans un régime fluidisé turbulent. Ceci a lieu dans une zone en transtension lors d'une décharge brusque de fluides hydrothermaux probablement issu d'un système porphyrique sous jacent.

INTRODUCTION

La ceinture de roche verte d'Abitibi est la plus étendue et la mieux connue au monde. (Wyman, 2003) L'Abitibi recèle de nombreux gisements notamment d'or orogénique et des amas sulfurés. Les gîtes porphyriques sont aussi présents (Jébrak et al, 1995, Pilote et al, 1996, Jébrak et Doucet, 2002) et le district de Chibougamau est un des rares districts porphyriques archéens économiques connus.

Ce district, à l'extrémité orientale de l'Abitibi, (figure 1) est l'une des grandes régions cuprifères du Québec. Les premières exploitations ont débuté en 1955 et se poursuivent depuis malgré quelques périodes de baisse des activités. Les gisements de Cu-Au de Chibougamau, des filons de sulfures massifs de chalcopryrite-pyrrhotite-pyrite, ont d'abord été interprétés comme des cisaillements à Cu-Au de «type Chibougamau» (Miller, 1961, Duquette, 1970), cette appellation reflétant bien la particularité de ces gisements. Kirkham et Sinclair (1995) et Pilote et al (1996) ont ensuite proposé un modèle général du district où les gisements cuprifères filoniens sont directement en relation avec les indices porphyriques du pluton de Chibougamau et où plusieurs brèches, dont celles de Queylus sont des breccia pipes associés aux gîtes porphyriques. Ces brèches se singularisent des nombreuses autres brèches de la région par son organisation interne particulière, notamment par un remarquable classement des fragments suivant leur granulométrie.

Dans les systèmes porphyriques, les breccia-pipes sont généralement situés au-dessus d'intrusifs minéralisés et sur des linéaments structuraux. La formation de la brèche s'explique par l'ébullition des fluides hydrothermaux emprisonnés au sommet de l'intrusif. Cependant, le contrôle structural des breccia-pipes n'est pas toujours mis en évidence et les modes de transport sont encore débattus (Lorenz, 1985,). Par l'étude détaillée des brèches de Queylus, nous proposons de montrer que le contrôle structural des breccias pipes peut être plus important que ce qui est admis jusqu'à présent et de mettre en évidence les mécanismes de transport impliqués dans ce type de brèche.

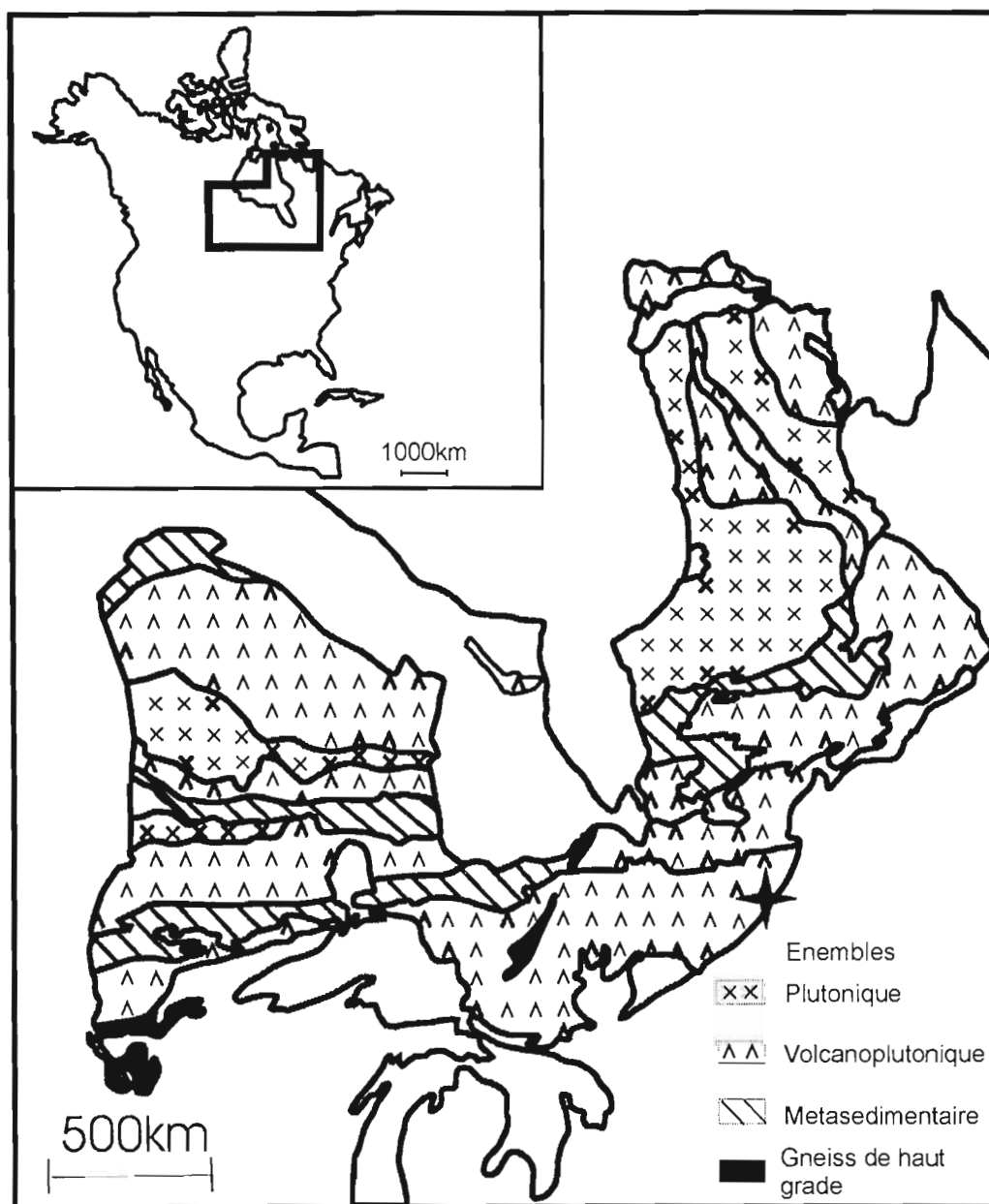


Figure 1: Carte de localisation de la province archéenne du Supérieur (encadré) en Amérique du Nord, et carte géologique simplifiée représentant les différents ensembles géologiques dont la sous province d'Abitibi. Le district de Chibougamau est représenté par l'étoile.

L'étude des roches fragmentaires comporte plusieurs aspects : granulométrie, géométrie et fabrique des fragments. De nombreux travaux ont été effectués sur les gouges de failles soit du point de vue granulométrique (Maronne et Scholtz, 1989; Lin et al. , 2001; Billi et al. , 2003; Monzawa et Otsuki, 2003) ou plus rarement sur l'orientation des clastes. (Cladouhos, 1999) Les dépôts pyroclastiques ont aussi été les sujets de travaux du point de vue granulométrique. (Saotome et al. , 2002). La géométrie des fragments a, ces dernières années, fait l'objet de plusieurs travaux via la géométrie fractale (Jébrak, 1997; Bérubé et Jébrak, 1999; Lorilleux et al, 2002; Clark et James, 2003). Cependant peu de travaux de détails ont été menés sur l'organisation interne des brèches.

Les brèches de Queylus présentent des altérations complexes traduisant la forte activité hydrothermale du district de Chibougamau. En se basant sur l'étude de l'organisation interne de la brèche et sur les différentes phases d'altérations, il sera possible de proposer un modèle de mise en place des brèches de Chibougamau et de les relier aux autres gisements du district.

CHAPITRE I

GÉOLOGIE LOCALE

Le district de Chibougamau est caractérisé par deux cycles volcaniques successifs. Le premier daté à 2730 Ma par Mortensen (1993) correspond à la mise en place d'une plaine basaltique tholeitique sous-marine et du complexe mafique lité du Lac Doré. Au cours du second cycle volcanique, entre 2720 et 2705 Ma, un volcan bouclier se met en place. Les laves potassiques de la formation volcano-sédimentaire d'Haüy lui sont associées (Figure 1.1) Le pluton de Chibougamau, daté à 2718 \pm 2Ma par U/Th sur zircon (Krogh, 1982) est un massif granitique polyphasé du second cycle volcanique où quatre phases majeures sont identifiables : La méladiorite à hornblende, la diorite quartzifère à hornblende et ou chlorite, la tonalite à biotite et/ ou chlorite et la leucotonalite (Racicot 1980, 1981)

Les levés magnétiques aéroportés et au sol (CGC, Gadoury, 1997) (Figure 1.2) mettent en évidence le caractère hétérogène du pluton sur sa bordure sud. Ainsi une anomalie magnétique négative circulaire de 6km de diamètre a été cartographiée. Cette anomalie circulaire négative est accentuée par une couronne fortement magnétique. C'est dans cette forte anomalie magnétique positive que se situe le système bréchique de Queylus. La forme d'une telle anomalie magnétique au sein d'un pluton granitique polyphasé suggère la présence d'une coupole d'une autre phase granitique dans le pluton de Chibougamau.

Le district de Chibougamau est affecté par trois phases de déformation archéennes qui peuvent être considérées comme un continuum de déformation. (Daigneault, 1996) La première phase provoque la formation de grands plis ouverts N-S, la seconde génère des plis régionaux E-W. Un de ces grands plis régionaux est l'anticlinal de Chibougamau dont le cœur est occupé par le pluton de Chibougamau. Enfin la troisième phase est plus discrète et se manifeste sous la forme de clivages de crénulation NE sub verticaux dans les zones de cisaillement.

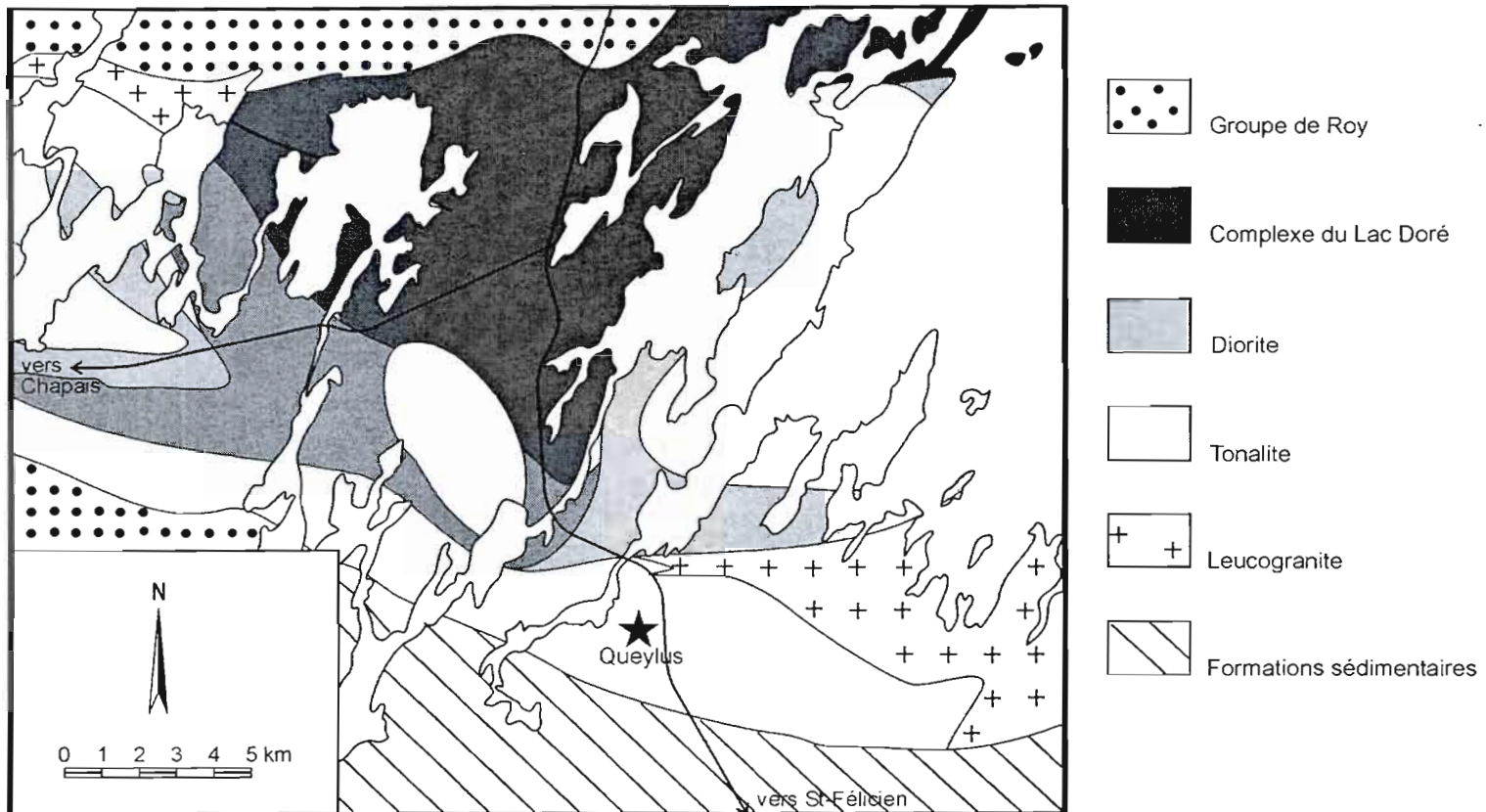


Figure 1.1: Carte géologique simplifiée d'après Racicot (1980, 1981) de la partie sud du pluton de Chibougamau localisant le secteur de Queylus dans une des phases tonalitiques

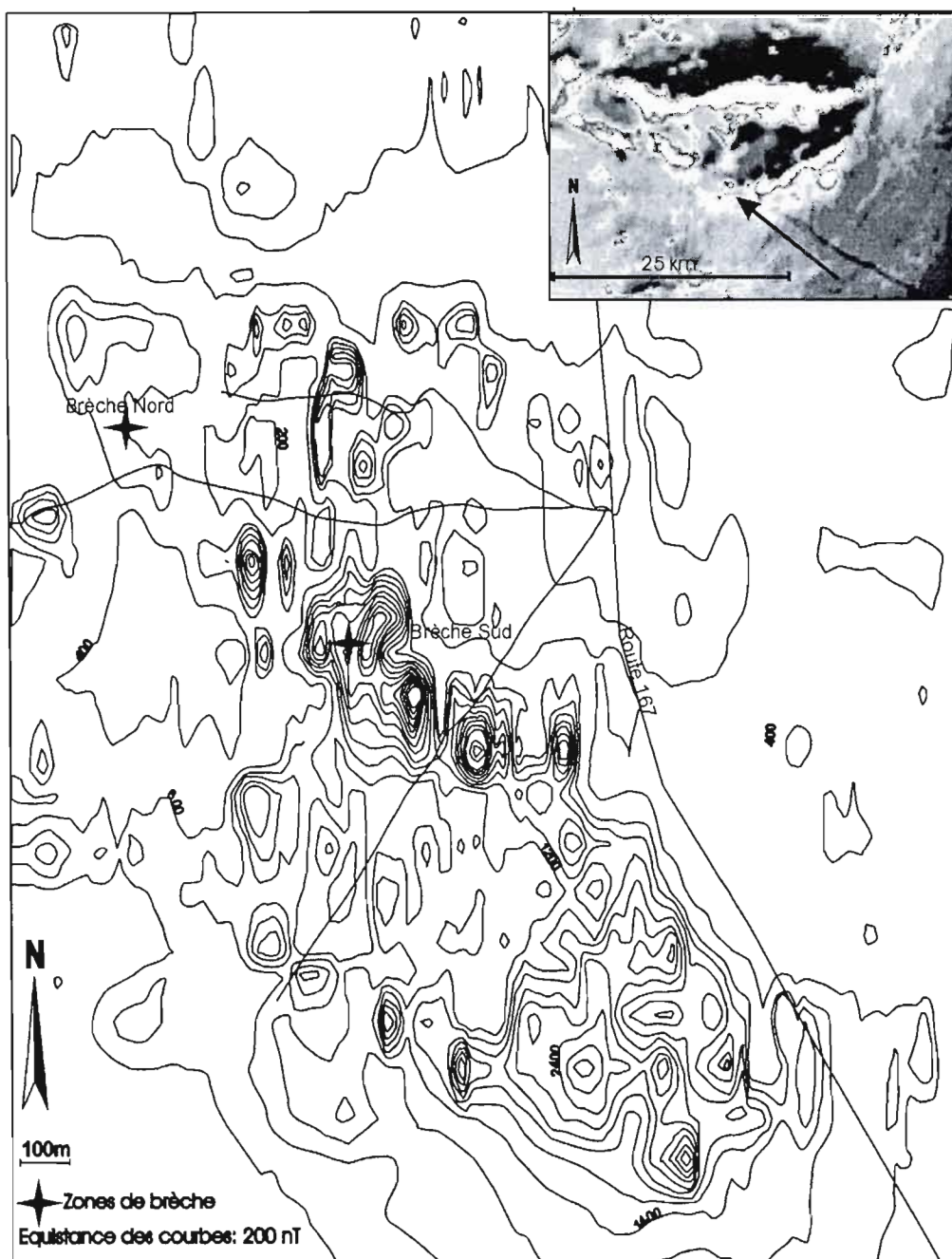


Figure 1.2: Lever magnétique aéroporté (encadré, Commission Géologique du Canada) montrant la localisation de l'anomalie magnétique de Queylus et lever magnétique au sol, modifié de Loubel, montrant la localisation des affleurements de brèche de Queylus.

CHAPITRE II

GÉOLOGIE DES BRÈCHES

Plusieurs zones de brèche sont connues au sud du district de Chibougamau. Les brèches de Queylus comprennent deux affleurements distincts, distant de 400m. L'affleurement Nord n'est pas continu et les contacts de la brèche ne sont pas connus avec précision. Il présente une forme allongée de 25 mètres par 30 mètres orientée approximativement E-W. Cette brèche possède la particularité de présenter deux faciès différents. Le premier est un faciès homogène, tandis que le second, en périphérie de l'affleurement présente des « poches » de fragments triés selon leurs tailles, et forment ainsi des poches granulométriques.

La brèche Sud, encaissée dans une tonalite à gros grains, est une zone de brèche limitée par deux veines de tourmaline massive de 10cm de puissance, orientée N110 qui se rejoignent aux extrémités délimitant une forme sub-losangique. (Figure 2.1) Cette structure est occupée par une brèche qui montre deux faciès. (Figure 2.1) Le premier est une brèche hydraulique où les fragments sont individualisés par un réseau très dense de veinules de tourmaline. Le second est une brèche plus évoluée avec une proportion de matrice plus importante. Les fragments proviennent de la tonalite encaissante et la matrice est composée de poussière de roche et de tourmaline. Les fragments ne présentent pas à proprement parler d'organisation contrairement à la brèche principale.

Dans une des veines de tourmaline délimitant la structure sigmoïde, un réseau de veinules de tourmaline se développe entre deux veines parallèles plus importantes. La géométrie de ce réseau de fracture s'accorde parfaitement avec le développement de fracture R et R' dans une zone de relais développé dans un cisaillement dextre. (Figure 2.1) La structure sigmoïde est donc considérée comme une zone de relais développée entre deux veines de tourmaline dans une zone en transtension à mouvement dextre. Ces observations démontrent l'origine structurale des brèches de Queylus.

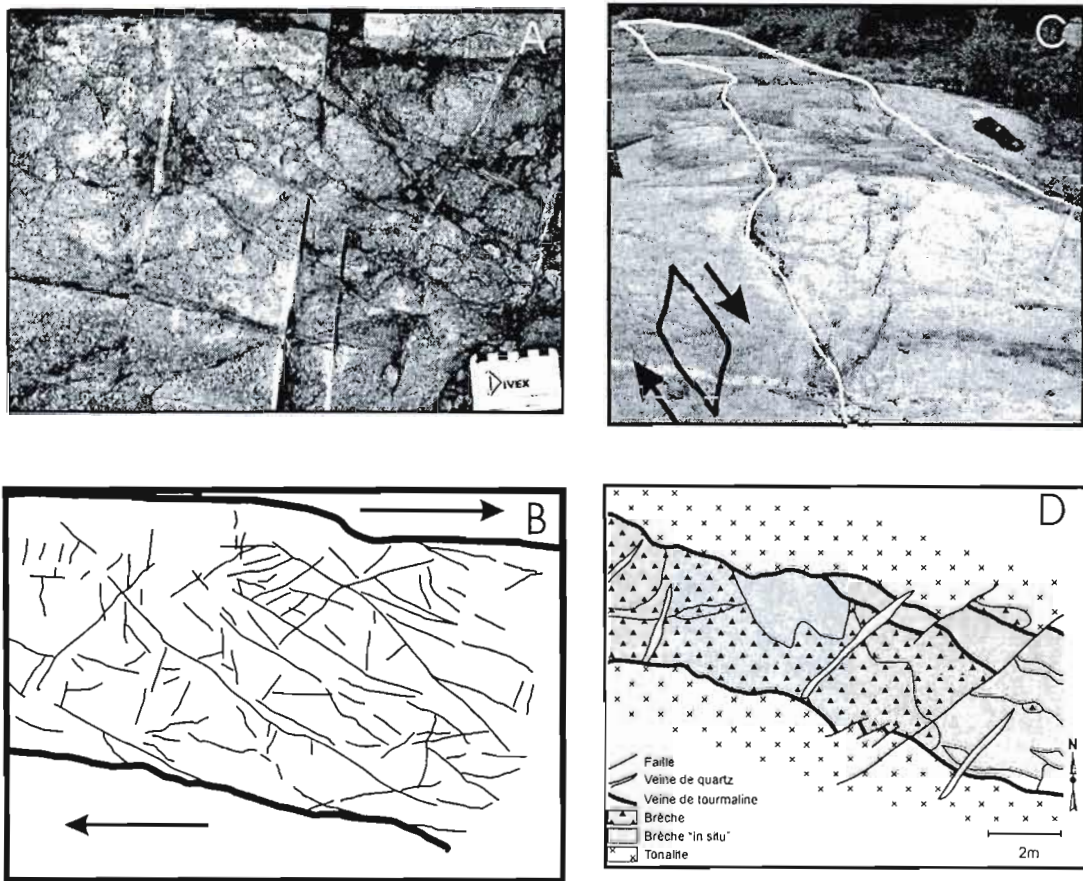


Figure 2.1: Schémas et clichés de la brèche sud. La photo A montre une veine de tourmaline bréchique. Le schéma B montre l'interprétation de A. On y remarque le développement d'un cisaillement de type Riedel. Cette interprétation permet de déduire un mouvement dextre de la structure de la brèche Sud. Le cliché C représente une vue de la moitié de la structure bréchique sigmoïde. Le schéma D est une cartographie de détail du centre de la brèche sud mettant en évidence un facies de brèche hydraulique (grisé plein) et un facies présentant un taux de dilatation plus important (grisé avec triangles).

Ces zones de brèche accompagnées de fortes altérations hydrothermales, parfois minéralisées en Cu(-Au) sont interprétées comme des breccia-pipes en relation avec des systèmes porphyriques. (Bureau, 1980; Pilote 1996; Gadoury, 1997)

2.1 Les fragments

Les travaux de terrain montrent une diversité dans la nature des fragments de la brèche Nord. Quatre groupes peuvent être identifiés :

- i) Les fragments tonalitiques à gros grains, qui représentent environ 85% du nombre total de fragments;
- ii) Les fragments tonalitiques à grains fins qui regroupent environ 20% des fragments;
- iii) Les fragments de méladiorite qui participent à hauteur de 3%;
- iv) Les fragments de quartz et de magnétite représentant chacun 1% du total des fragments

Les anomalies géochimiques négatives en Ta, Nb, et Ti (Figure 2.2) des fragments tonalitiques et de l'encaissant montrent qu'il s'agit bien de Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite. (Tableau 2.1) De plus le profil des éléments incompatibles est très similaire à celui obtenu par Condie (2005) pour la moyenne des TTG archéennes. Cependant il est très difficile de définir plus précisément les roches de Queylus. Géochimiquement ces échantillons tombent dans le champ des granites alcalins ou des granites dans un diagramme de Cox. (Figure 2.2) Les observations microscopiques montrent une altération intense marquée par la déstabilisation totale ou quasi totale des ferromagnésiens et des feldspaths. Cette altération a pour effet de déplacer les échantillons vers le champ des granites et des granites alcalins. Le même phénomène est rencontré pour l'échantillon de méladiorite. On utilisera cependant la nomenclature des travaux antérieurs (Bureau 1980, Racicot 1981) soit tonalite, et méladiorite.

Géochimiquement la tonalite et la méladiorite montrent des spectres de terres rares similaires avec un fractionnement plus faibles des terres rares lourdes dans la méladiorite (Figure 2.2) en accord avec le comagmatisme admis pour les différentes phases du pluton. (Mueller et al, 1989) Des fragments de dykes quartzo feldspathiques reconnus à l'affleurement sont aussi présent dans la brèche et présentent la même altération intense. On retrouve aussi des fragments de quartz et de magnétite provenant du démembrement de

veines précoces. La brèche sud contient uniquement des fragments de tonalite à gros grains provenant de l'encaissant immédiat. Ces fragments présentent les mêmes caractéristiques pétrologiques et géochimiques que ceux de la brèche nord.

2.2 La matrice

La matrice de cette brèche se compose principalement de poussière de roche. Cette poussière de roche comprend des micro fragments mono-cristallins de quartz et des cristaux de séricite. Elle est cimentée par des phases minérales hydrothermales dont la principale est la tourmaline. Les autres phases hydrothermales qui accompagnent la tourmaline sont par ordre décroissant la chlorite, l'albite, l'apatite, l'allanite, la titanite, la magnétite, la pyrite, la chalcopryrite, la calcite et la barytine.

Les comparaisons des matrices et des fragments montrent une immobilité du K et Rb. (Figure 2.3) Ces deux éléments caractérisent la muscovite. Leurs concentrations quasi similaires entre les fragments et la matrice indiquent que lors de la bréchification il n'y a pas d'enrichissement en K et Rb ce qui implique une cristallisation pré-bréchification des muscovites. Il faut aussi remarquer que la matrice de la brèche contient énormément de micro fragments mono cristallins de quartz indiquant une forte proportion de poussière de roche. Aucun micro fragment de feldspath n'a été reconnu. L'abondance de séricite dans la matrice s'explique par une forte proportion de poussière de roche. La séricite se développe aux dépens des feldspaths de la tonalite. La bréchification produit de la poussière de roche composée de micro fragments de quartz d'une part et de séricite issues du broyage des feldspaths.

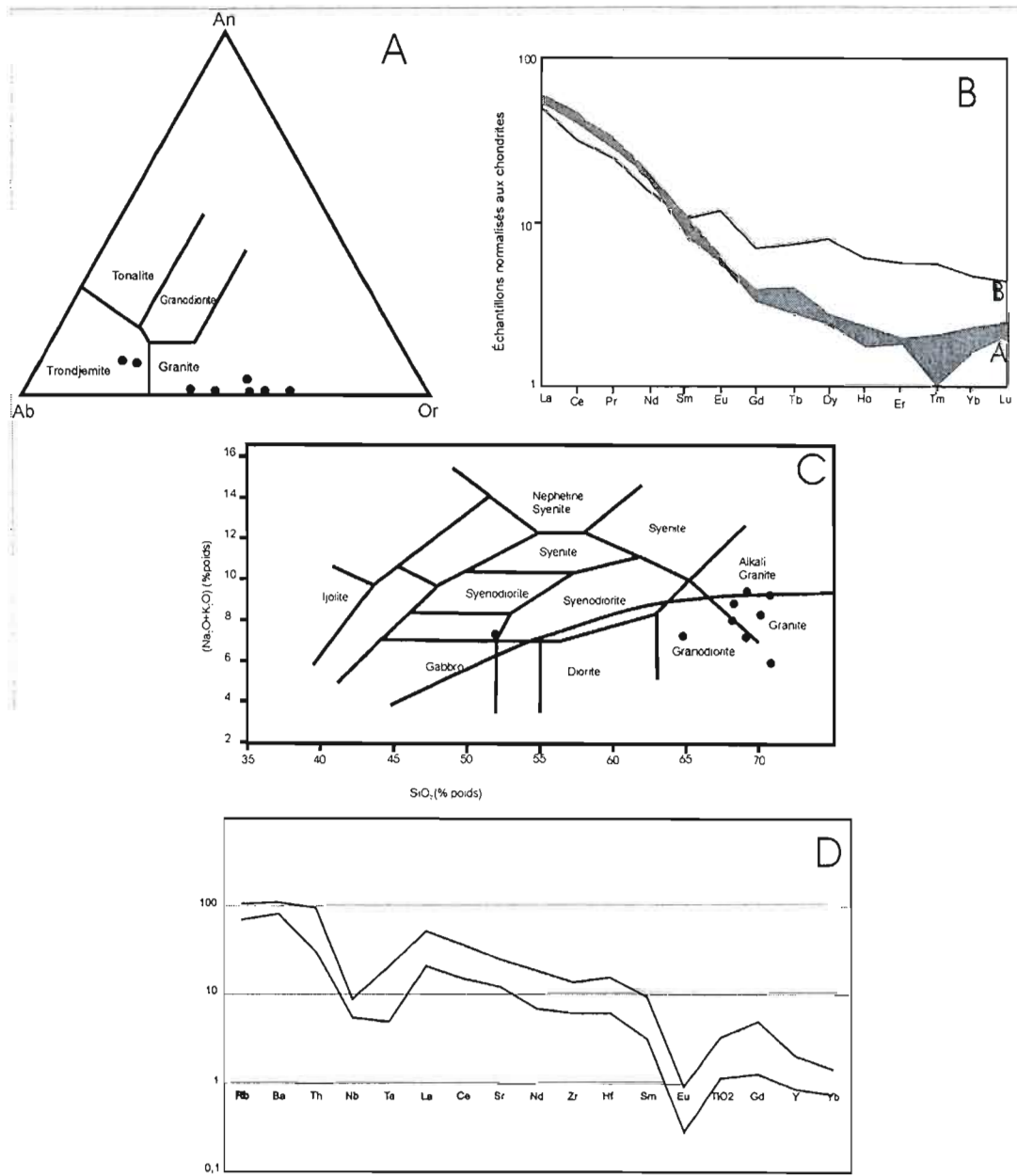


Figure 2.2: Diagrammes géochimiques des fragments des brèches. Le diagramme A montre la nature granitique des fragments tout comme le diagramme C. Les profils de terres rares (diagramme B) montrent le comagmatisme des fragments tonalitiques et dioritiques. Le diagramme de Condie (D) démontre l'appartenance des échantillons de Queylus à la suite des TTG archéennes

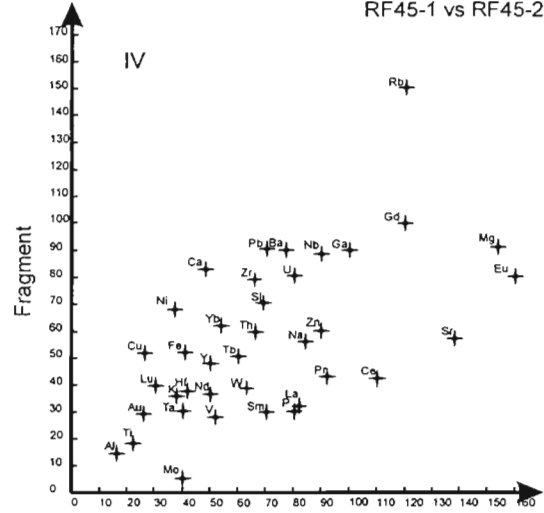
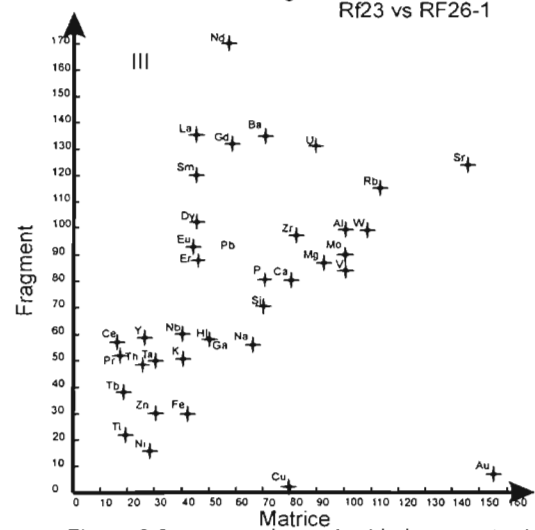
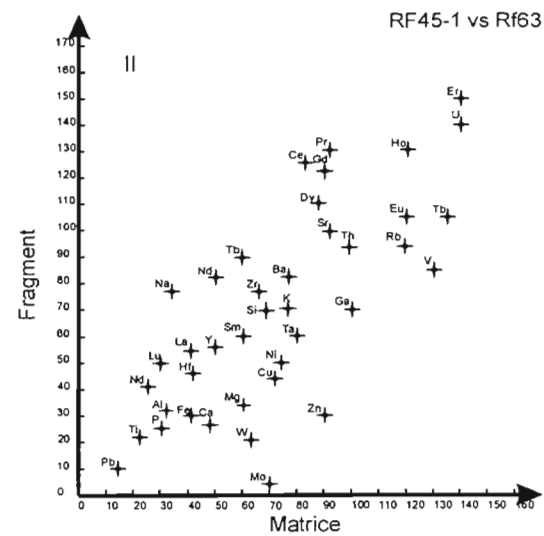
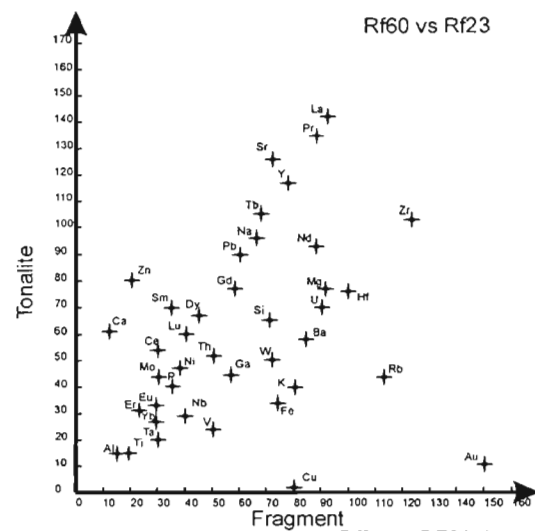


Figure 2.3: comparaison géochimique entre les fragments et la tonalite encaissante (I) et entre les matrices et les fragments de la brèche (II, III, IV). L'immobilité des éléments chimiques entre les fragments et la matrice montre leurs origines communes.

	fragment	fragment	fragment	fragment	fragment	fragment	fragment	fragment	matrice	matrice	matrice	matrice	matrice	matrice	tonalite
	RF00-1	RF26.2	RF 45-1	RF71	RF 47	RF 48	RF26.3	RF23	RF26.1	RF 61	RF 44	RF00-2	RF 45-2	RF 63	RF60
SiO2	67,75	68,60	68,82	75,25	68,94	65,76	52,52	70,43	70,80	70,98	71,64	74,59	70,13	70,22	65,12
TiO2	0,19	0,20	0,22	0,13	0,21	0,22	0,35	0,19	0,22	0,12	0,17	0,15	0,18	0,2	0,15
Al2O3	16,76	14,45	16,2	13,24	15,63	15,53	12,85	15,05	15,00	13,14	13,93	13,39	13,82	15,76	14,72
Fe2O3	3,64	6,90	4,11	2,26	4,22	6,28	25,12	4,24	3,01	6,04	2,16	3,07	5,22	3,06	1,72
Cr2O3	0,00	0,02	0,003	0,00	0,003	0,001	0,08	0,00	0,00	0,0005	0,002	0,01	0,001	0,002	0,00
MgO	1,24	1,13	1,54	0,51	0,94	1,38	1,14	0,92	0,87	2,13	0,39	1,19	0,91	1,12	0,77
MnO	0,01	0,005	0,005	0,005	0,01	0,01	0,005	0,005	0,01	0,03	0,01	0,005	0,01	0,01	0,00
CaO	0,15	0,14	0,48	0,11	0,23	0,29	0,22	0,24	0,24	0,76	1,49	0,21	0,83	0,27	1,23
Na2O	2,00	2,18	2,17	2,97	3,54	0,44	1,87	3,32	2,80	2,98	4,43	2,74	1,43	3,53	4,78
K2O	5,58	4,53	3,9	3,87	4,59	5,8	4,04	3,98	5,13	1,53	3,46	2,60	4,64	3,54	1,96
P2O5	0,06	0,07	0,08	0,01	0,09	0,09	0,14	0,07	0,08	0,04	0,07	0,04	0,03	0,07	0,08
Ba	1102,00	842,00	772	1089,00	936	1147	808,00	847,00	1623,00	409	1316	444,00	896	819	579,00
Ni	10,00	10,00	10	10,00	10	21	30,00	10,00	10,00	20	10	10,00	10	21	10,00
Sc	2,00	5,00	3	1,00	4	3	8,00	3,00	2,00	1	1	3,00	2	3	1,00
LOI	2,40	1,70	2,4	1,50	1,5	4,1	1,50	1,40	1,50	2,1	2,1	1,60	2,7	2,1	1,70
TOT/C	0,05	0,05	0,06	0,08	0,005	0,03	0,03	0,03	0,06	0,005	0,29	0,01	0,2	0,04	0,13
TOT/S	0,02	0,01	0,07	0,01	0,01	1,54	0,17	0,03	0,10	0,21	0,03	0,01	1,02	0,04	0,01
Total	99,91	100,01	100,01	99,97	100,01	100,03	99,85	99,94	99,84	99,9	100	99,64	100,01	99,98	100,02
Mb	0,30	2,40	40,3	2,90	7,5	3,1	2,40	1,00	0,90	0,4	0,8	1,20	4,8	1,8	1,10
Cu	62,50	13,60	13	3,50	18,3	44,4	25,70	799,30	23,70	2,2	61,1	129,40	25,6	11,4	16,30
Pb	0,30	0,80	1,4	0,50	1	1,8	0,90	0,60	0,90	1	1,6	0,60	1,8	1	0,90
Zn	1,00	4,00	9	1,00	3	5	8,00	2,00	2,00	41	3	1,00	6	3	8,00
Ni	2,10	7,10	3,7	1,40	4,1	5,5	28,90	3,80	1,60	16,4	3	2,50	6,8	2,5	4,70
As	-	-	0,5	-	-	18,2	-	-	2,50	-	0,6	-	1,6	0,9	-
Cd	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	-	-
Sb	-	0,10	0,1	-	0,1	0,1	0,10	-	-	-	0,1	-	0,1	-	-
Br	-	-	0,1	-	-	0,4	0,10	0,10	0,10	0,1	-	-	0,1	-	-
Ag	-	-	0,1	-	-	0,6	0,10	0,10	0,10	-	-	-	0,1	-	-
Au	0,60	-	2,6	0,60	0,5	12,4	3,40	15,50	0,70	1,3	-	-	2,9	-	1,10
Hg	-	-	-	-	-	0,01	-	-	0,01	-	-	-	-	-	-
Tl	-	-	0,1	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-	0,1	-	-
Se	-	-	-	-	-	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ga	22,80	18,20	20,6	12,60	21,8	24,3	18,10	19,10	17,80	10,8	12,4	17,20	17,8	13,9	14,60
Hf	2,50	2,30	2,1	2,20	2,1	2,8	1,80	2,50	2,90	1,9	2,3	1,90	1,9	2,3	1,90
Nb	4,50	4,30	4,5	4,50	4,2	5,3	7,30	4,00	6,00	4,2	6,3	3,40	4,4	3,9	3,90
Rb	166,20	143,90	119,8	84,90	100,4	178,3	137,60	113,30	115,20	36,9	67,7	79,90	148,5	94	44,40
Sn	-	-	1	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sr	91,40	68,50	92,1	176,10	152	24,2	60,40	145,80	124,50	205,4	226,5	172,90	37,6	100,3	253,70
Ta	0,30	0,30	0,4	0,40	0,3	0,4	0,50	0,30	0,50	0,2	0,3	0,20	0,3	0,3	0,20
Th	1,60	2,10	3,3	1,70	3,2	2,9	3,20	2,50	4,80	3,4	4,8	2,40	3	3,1	2,60
U	0,40	1,40	0,8	0,40	1,4	4,4	8,00	0,90	1,30	0,9	2,5	0,50	0,8	0,8	0,70
V	26,00	33,00	26	12,00	28	29	46,00	25,00	21,00	6	7	27,00	14	19	12,00
W	3,50	3,40	6,3	3,50	2,6	3,9	6,90	3,60	3,30	1,6	4,9	1,90	3,9	2,1	2,50
Zr	74,60	73,10	66,1	75,30	76,3	96,3	55,60	82,10	97,00	59,1	69,8	56,40	79	77,8	69,30
Y	2,40	3,20	2,5	1,70	2,9	2,6	10,60	2,60	5,80	2,5	4	3,40	2,4	2,8	3,90

La	4,50	4,70	4,1	1,60	9,9	8,6	11,70	9,20	27,20	21	23,1	8,50	1,6	5,5	14,20
Ce	10,70	9,50	8,3	3,40	20,8	17,7	19,50	15,60	56,10	38,3	43,6	23,30	3,2	12,5	26,90
Pr	0,98	1,05	0,92	0,35	2,11	1,98	2,04	1,76	5,31	4	4,99	1,81	0,43	1,3	2,71
Nd	3,50	3,90	2,5	1,10	6,3	6,7	7,20	5,70	17,00	11,9	14,5	6,00	1,8	4,1	9,30
Sm	0,60	0,70	0,7	0,20	1,1	1,3	1,60	0,90	2,40	1,6	2,5	1,00	0,3	0,7	1,40
Eu	0,17	0,21	0,16		0,27	0,33	0,66	0,29	0,62	0,4	0,5	0,25	0,08	0,14	0,33
Gd	0,42	0,53	0,45	0,21	0,75	0,77	1,42	0,68	1,32	0,7	0,91	0,74	0,41	0,56	0,77
Tb	0,06	0,11	0,06	0,03	0,08	0,07	0,27	0,09	0,19	0,08	0,14	0,10	0,05	0,09	0,14
Dy	0,44	0,59	0,44	0,23	0,55	0,47	2,00	0,45	1,02	0,53	0,72	0,65	0,34	0,51	0,67
Ho	0,07	0,10	0,08	0,05	0,09	0,08	0,34	0,08	0,18	0,07	0,12	0,10	0,06	0,08	0,12
Er	0,23	0,28	0,28	0,17	0,31	0,22	0,93	0,23	0,44	0,25	0,35	0,32	0,24	0,31	0,31
Tm	-	-	-	-	-	-	0,14	-	0,06	-	-	0,05	-	-	0,05
Yb	0,21	0,34	0,27	0,26	0,33	0,34	0,77	0,29	0,45	0,27	0,33	0,35	0,31	0,21	0,37
Lu	0,04	0,05	0,03	0,04	0,06	0,07	0,11	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,06

Tableau 2.1: Analyses multi élémentaires des différentes composantes des brèches de Queylus

CHAPITRE III

LES VEINES

La brèche Sud montre un contrôle structural important qui se manifeste par une grande concentration de veines et veinules. Ces veines et veinules bien que moins bien exprimées sur la brèche Nord sont aussi présente. Ces veines présentent un grand intérêt pour établir la chronologie des événements responsables de la bréchification et dans la détermination des différentes phases d'altération présentes dans les brèches de Queylus.

Les brèches et leur encaissant immédiat sont recoupées par des veines et veinules qui peuvent être classées en trois catégories :

- les veines pré-bréchification comprenant des veines de quartz, quartz-magnétite et de magnétite
- les veines synbréchification regroupant les veines de tourmaline et de magnétite
- les veines post-bréchification correspondant aux veines de quartz et de calcite.

3.1 Veines pré-bréchification

Trois familles de veines pré-bréfication (Tableau 3.1) ont été mise en évidence par des relations de recoupement sur le terrain : les veines de quartz, de magnétite et de quartz magnétite. L'antériorité de ces veines par rapport à la bréchification est marquée par la présence de fragments de ces veines dans la brèche nord. Les filons de magnétite et de quartz-magnétite sont présents dans la tonalite encaissante dans un rayon de 100 m autour des brèches. La puissance de ces veines est comprise entre quelques millimètres et un centimètre pour les veines de magnétite, et de 0,5 à 10 cm pour les veines de quartz-magnétite. Le recoupement des veines de quartz par les veines de magnétite observé sur le terrain montre la postériorité des veines de magnétite par rapport aux veines de quartz.

3.1 Veine syn-bréchification

A l'affleurement, les veines de tourmaline sont les plus nombreuses et les mieux développées. Elles offrent différents aspects allant de veines massives pouvant atteindre 30 cm de puissance à des réseaux denses de veinules millimétriques. Ces veines contiennent principalement de la tourmaline avec de faibles quantités de chlorite, d'albite, d'apatite et de titanite.

Les structures orientées les mieux visibles se situent dans le secteur de la brèche sud. (tableau 3.1) Une structure de forme sigmoïde est orientée N120 est particulièrement instructive. Elle se présente comme le dédoublement d'une veine de tourmaline massive (Figure 3.1) de 10 cm de puissance. De rares fragments tonalitiques contiennent des veinules de tourmaline restreintes aux fragments. Certaines veines contiennent entre 5 et 25% de magnétite. Ces veines composites magnétite-tourmaline individualisent localement des fragments.

Les veines de magnétite se retrouvent principalement aux abords immédiats du corps bréchique Nord. (100 mètres environ) Elles sont composées de magnétite au sein de laquelle on retrouve quelques plages isolées de quartz. Les zones de bordure de la brèche montrent aussi des réseaux denses de veinules à magnétite isolant ainsi des fragments de tonalite encaissante.

3.2 Filons post-bréchiques

Il existe deux familles de veines tardives par rapport à la bréchification. Le corps bréchique principal est recoupé par un filon de quartz atteignant 20 cm de puissance et par plusieurs filonets quartzeux majoritairement orientés N40-N50.

Une seconde famille recoupe la brèche; il s'agit de veinules de calcite principalement orientées N70. Cette calcite est accompagnée ou non d'autres phases minérales telles que la pyrite, la chalcopryrite et la magnétite à proximité de la brèche, les veinules contiennent en plus de la calcite, du quartz, des sulfures et de la magnétite. Dans les zones plus distales vis

a vis du corps bréchique, ce système apparaît comme des veinules à calcite dominante avec quelques rares cristaux de pyrite.







Veines	Quartz	Quartz-magnétite	Magnétite	Tourmaline	Calcite
Pré-bréchification	 N20	 N40			
Syn-bréchification			 N120-130	 N80 N130-150 N110	
Post-bréchification	 N60				 N30-70

Tableau 3.1: Orientations majeures des différentes familles de veines observées dans le secteur de Queylus. Les relations de ces veines vis à vis de la bréchification reposent sur des observations de terrain.

Des veinules de magnétite tardives recoupent aussi la brèche sud. Cependant la présence de veines précoces, de veines composites magnétite-tourmaline et de veines tardives doit être considérée comme un unique épisode couvrant les premiers épisodes de bréchification, la bréchification et les dernières manifestation hydrothermales. Les veines de calcite-quartz-magnétite-sulfures doivent être considérées de la même façon.

CHAPITRE IV

ALTÉRATIONS

Les brèches de Queylus se caractérisent par cinq phases d'altération : une altération phyllique, une hématisation, une phase propylitique liée à la bréchification suivie d'une altération à carbonates. Une altération supergène est aussi identifiable. (Figure 4.1)

4.1 Altération phyllique

Les roches encaissantes et les fragments de la brèche, quelles que soient leurs natures, sont très intensément altérés. Cette altération se manifeste par une déstabilisation des feldspaths, notamment des plagioclases qui sont remplacés par des séricites. Les analyses au microscope électronique à balayage montrent qu'il s'agit de muscovites ayant une légère tendance phengitique. Cette séricitisation importante s'accompagne du développement de pyrite. Certaines pyrites de la matrice sont recoupées par des micro veinules de séricite. Ces micro veinules sont limitées au cristal de pyrite. Une partie des pyrites est donc antérieure à la bréchification. Il en va de même pour la séricite. Il existe aussi dans la matrice des cristaux de pyrite présentant des cristallisations de quartz en ombres de pression.

La comparaison des analyses chimiques des différents constituants des brèches de Queylus par rapport à un échantillon peu altéré montre que les fragments de tonalite présent dans la brèche sont enrichis en K et Rb et appauvris en Sr et Eu. (Figure 2.3) Ceci s'explique par la déstabilisation des feldspaths de la tonalite et par le développement de séricite lors de l'altération phyllique.

	Altération phyllique	Altération à hématite	Altération propylitique	Altération à carbonates	Altération à goethite
Muscovite	_____				
Quartz	_____			_____	
Pyrite	_____			_____	
Rutile	_____				
Hématite		_____			_____
Albite			_____		
Allanite			_____		
Apatite			_____		
Chlorite			_____		
Magnetite		_____	_____		
Tourmaline		_____	_____		
Titanite			_____		
Barytine			_____		
Calcite			_____	_____	
Chalcopyrite			_____	_____	
Molybdenite				_____	
Goethite					_____
Covelite					_____
Carbonates REE					_____
Malachite					_____

Figure 4.1: Séquence paragénétique observée dans les brèches de Queylus. Les relations entre les différentes phases ont été déduites des observations de terrain et des lames minces.

4.2 Phase à hématite

De nombreux fragments tonalitiques de la brèche ont une teinte rosée due à l'hématisation. Ces fragments se retrouvent dans la partie sud de la brèche nord et sur la brèche sud. L'hématisation n'est présente que dans les fragments et n'affecte pas la matrice. Les fragments sont uniformément hématitisés et ne présentent pas de fronts de propagation. Ce phénomène s'est donc produit avant la bréchification. Les observations microscopiques montrent une hématisation des plans de clivages des séricites qui se sont développés aux dépens des plagioclases, ce qui permet de replacer cette phase dans le temps entre la phase phyllique et la bréchification.

4.2 Phase propylitique

On retrouve dans et autour de la brèche une altération caractérisée par des minéraux tels que la tourmaline, l'albite, l'allanite, la titanite, l'allanite, la pyrite, la chalcopryrite et la magnétite compatible avec une altération propylitique. Cette phase plus restreinte spatialement semble néanmoins particulièrement significative puisqu'elle ne se retrouve que centrée sur les affleurements bréchiques.

Cette altération se retrouve dans la brèche Nord, mais aussi dans la brèche Sud. L'observation au microscope et au microscope électronique à balayage montre que ces espèces minérales sont contemporaines. Ainsi, les cristaux de tourmaline formant des rosettes contiennent occasionnellement des segments d'apatite. Dans la brèche sud, les veines et veinules qui fracturent la tonalite ont la même minéralogie. Des chlorites accompagnent cette phase. Cette phase propylitique occupe principalement les espaces laissés libres par la bréchification sans grand remplacement dans les fragments de la brèche. Seules l'allanite et la chlorite se retrouvent à la fois dans les fragments et dans la matrice. Ces deux minéraux au sein des clastes proviennent de la déstabilisation de ferromagnésiens déjà partiellement déstabilisés par la première phase phyllique.

Une grande quantité magnétite est associée à cette altération propylitique. Elle se manifeste par des veines et de veinules, par la cristallisation de cristaux automorphes dans la matrice, et par un remplacement complet ou quasi-complet des minéraux ferromagnésiens présent dans les fragments de méladiorite de la brèche. Dans les fragments méladioritiques, les amphiboles sont partiellement ou totalement pseudomorphosées en magnétite. Dans la

matrice et dans les clastes plus felsiques, la magnétite se rencontre sous forme de veinules, d'amas de cristaux en lattes ou baguettes parfois associées à de la pyrite et du quartz ou en individus automorphes dispersés dans la matrice.

Les chlorites ont été analysées au microscope électronique à balayage après avoir été identifiées au microscope optique comme associées à l'épisode à tourmaline. La présence de chlorite associée à la phase hydrothermale à tourmaline permet d'estimer la température des fluides hydrothermaux responsables de cette phase d'altération. (Cathelineau et Nieva, 1985; Cathelineau, 1988; Kranidiotis et Mc Lean, 1987; Jowett, 1991; Frimmel, 1997)

Sur cinq cristaux, les résultats obtenus par la formule de Frimmel montrent une température de formation des chlorites comprise entre 323 et 348°C (tableau 4.1), avec une moyenne de $337 \pm 11^\circ\text{C}$.

Cristal	29-5a	29-31	12-1a	29-2a	3-1a
Température Calculée (°C)	337	347	327	348	323

Tableau 4.1 : Résultats des calculs de températures de cristallisation des chlorites associées à la phase d'altération propylitique

4.3 Phase à carbonates

Postérieurement aux veines de magnétite s'est développé un réseau de veinules à quartz, calcite, magnétite, et sulfures. Ces veinules s'accompagnent d'une cristallisation de calcite très fine dans certaines zones de la matrice. Cette phase est d'extension relativement importante, plus étendue que la phase propylitique. Des veines de calcite affectent la tonalite encaissante jusqu'à 2 km de la brèche et la brèche elle-même.

Les veines à quartz, calcite magnétite, pyrite présentent une zonalité avec aux épontes du quartz, puis de la calcite et enfin au cœur une zone de magnétite au sein de laquelle on retrouve des sulfures. Les sulfures sont principalement la pyrite, la chalcopryrite et

un peu de molybdénite. Il existe accessoirement des tellurures d'argent en inclusion dans la chalcoppyrite.

4.4 Altération à goethite

A l'affleurement et sur quelques lames minces, il est possible de noter les effets d'une altération supergène notamment par le développement d'hydroxydes de fer de type goethite et d'hématite dans des zones riches en sulfures. On remarque aussi un remplissage tardif de certaines micro-cavités par de la malachite, des carbonates de terres rares. Les zones minéralisées montrent des altérations de la chalcoppyrite en covélite sur les bordures des cristaux. Les bordures de certaines veines de magnétite développent une altération à hématite tardive. Cette altération supergène génère aussi des couronnes d'hématite et de goethite sur les grains de sulfures.

CHAPITRE V

ORGANISATION DES BRÈCHES

La brèche Nord comprend trois zones (Figure 5.1) : La zone centrale granulométriquement homogène et sans fabrique visible et deux zones, au sud et nord de l'affleurement où des « poches », décimétriques à métriques, de fragments de tailles similaires ont été observées. Il existe aussi dans la matrice des laminations.

Les différentes poches granulométriques observées présentent une forme coudée allongée. Deux orientations des poches sont visibles : l'une à N120 et une seconde plus discrète à N20. (Figure 5.1) Les différentes poches s'emboîtent les unes dans les autres et les contacts entre chacune d'elles se matérialisent par des changements abrupts dans la taille des fragments. A l'intérieur de chacune des poches, les fragments s'orientent de manière sub parallèle aux contacts.

Afin de comprendre les mécanismes responsables d'une telle organisation, nous avons mené une étude sur les fragments eux-mêmes: géométrie des fragments, distribution granulométrique et fabrique. Les analyses de fabrique et de granulométrie ont été effectuées sur des clichés de carrés de un mètre carré par le logiciel NIH image. La détermination de la géométrie des fragments repose sur la détermination des dimensions fractales de bordure. La méthode utilisée est celle proposée par Bérubé et Jébrak. (1999) (Lorilleux et al, 2002; Ross et Jébrak, 2002) Des échantillons sciés ont été scannés à haute résolution et les images ont ensuite été traitées sous NIH image. Les résultats obtenus sont exprimés Fd^* , $Fd^* = (Fd - 1) * 100$ où Fd est la dimension fractale obtenue lors du calcul par NIH image. Les dimensions fractales de bordure varient entre 1 et 2, les valeurs proches de 2 correspondant à des formes complexes tandis que les valeurs proches de 1 indiquent un contour simple. Les Fd^* suivent le même comportement. Leurs valeurs sont comprises entre 0 et 100. Plus le Fd^* est élevé, plus la forme est complexe.

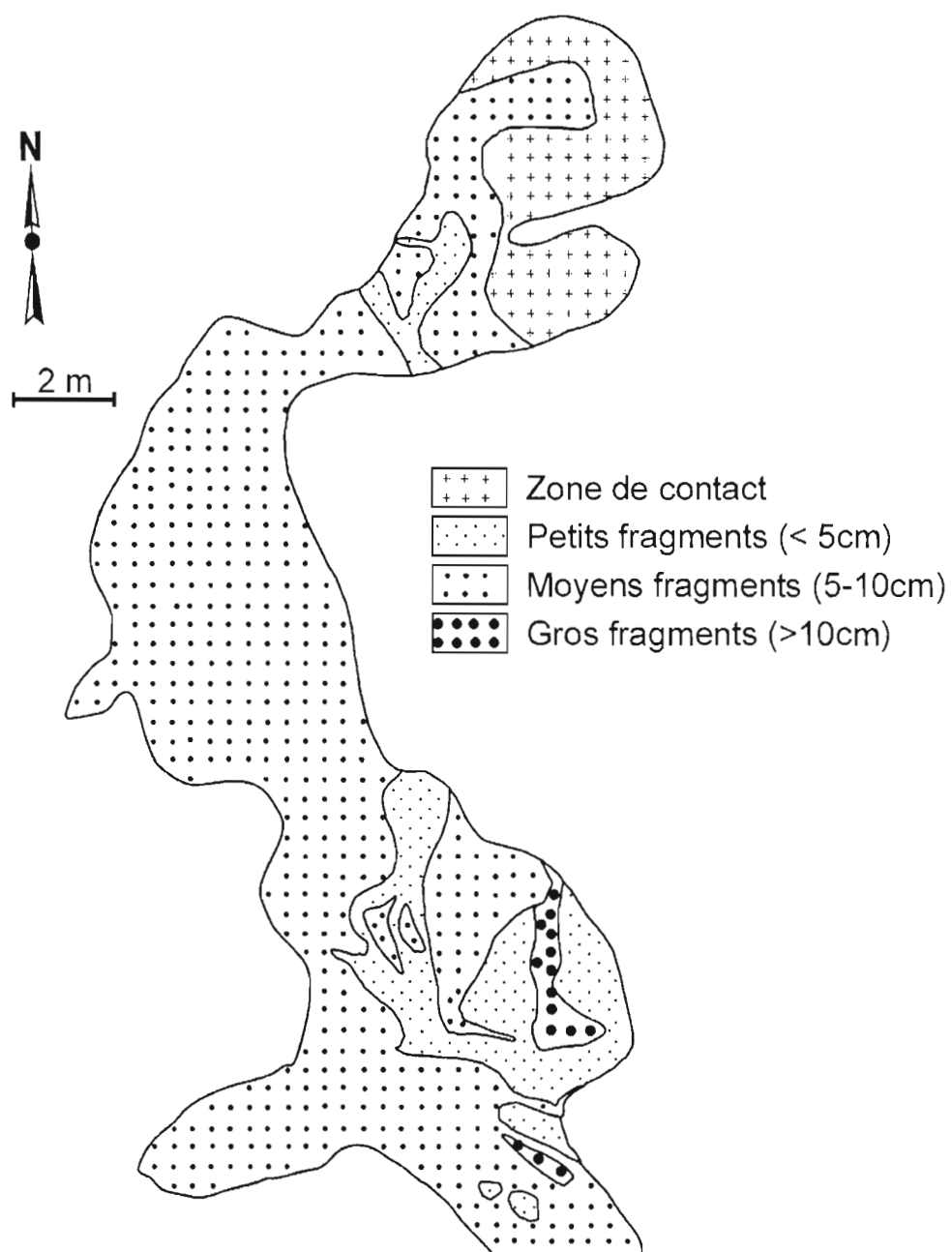


Figure 5.1: Cartographie de détail de l'affleurement Nord des brèches de Queylus mettant en évidence l'organisation de la brèche en poches granulométriques.

Les différentes distributions granulométriques obtenues sur les brèches de Queylus (Figure 5.2) peuvent être interprétées comme log-normale ou comme fractale. La limite de résolution des clichés entraîne une sous évaluation des fragments de petite taille. Or la différence entre ces deux types de distribution se fait pour des valeurs faibles, car ensuite ces deux distributions deviennent très similaires. Dans notre méthode, les fragments les plus petits ont été sous évalués car difficilement distinguables dans la matrice. Cette incertitude dans la méthode nous empêche de trancher de manière certaine entre ces deux types de distribution.

De nombreux types de distribution ont été utilisés dans les études de roches clastiques: Distribution de poisson (Léanau, 1936; Bennett, 1936), Log normale (Kolmogorov, 1941), bimodale. (Gaudin et Meloy, 1962) Cependant les derniers travaux sur les gouges de faille (Sammis et al 1987; Sammis et Biegel, 1989; An et Sammis 1994) et brèches de failles (Monzawa et Otsuki, 2003) aboutissent à une distribution de type fractale des particules engendrées. Le caractère structural des brèches de Queylus étant établi, l'adoption d'une distribution fractale des fragments est donc la plus pertinente.

5.1 Faciès non classé

La cartographie de détail de la brèche Sud a permis de discerner deux types de brèches non classées. Le premier est une brèche in situ qui occupe environ 80% de la surface. Le second faciès se différencie par une quantité plus importante de matrice. Cette différence est cependant limitée et les deux faciès peuvent être qualifiés de « clast-supported ». L'observation microscopique montre que la matrice de cette brèche se compose principalement de tourmaline avec de faible quantité de chlorite, apatite et titanite et d'une quantité variable de poussière de roche. La cartographie de la brèche Sud a permis cette division suivant la quantité de matrice présente mais n'a pas permis de différencier de zones granulométriquement différentes. Aucune évidence de transport des fragments n'est visible.

Les courbes granulométriques cumulées sur les fins (figure 5.2) obtenues sont unimodales et sans rupture de pente. Une telle distribution implique que les zones des faciès bréchiques non classés contiennent toutes les fractions de fragments issus de l'épisode de fragmentation initiale, et donc que cette zone n'a pas subi de tri. Tout apport ou retrait de

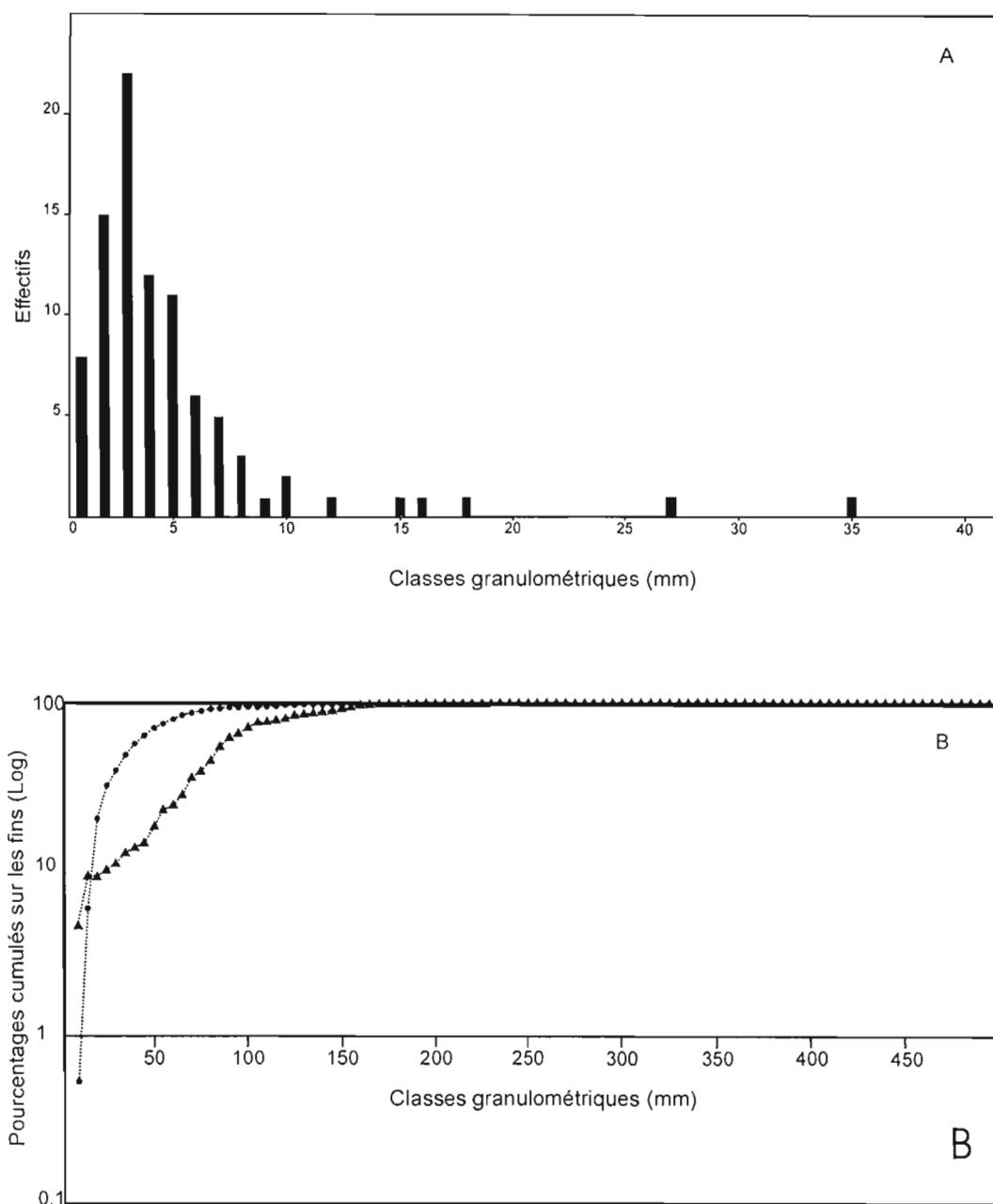


Figure 5.2: Distributions granulométriques d'une veine bréchique de l'affleurement Sud (A) et de la brèche Nord (B). Le diagramme des distributions granulométriques d'une brèche de la zone Sud (A) montrent une distribution proche de la distribution fractale. Le schéma B montre une comparaison entre les distributions granulométriques cumulées sur les fins de 2 zones d'un mètre carré, l'un dans la zone triée, (triangle) l'autre dans la zone non triée (ronds)

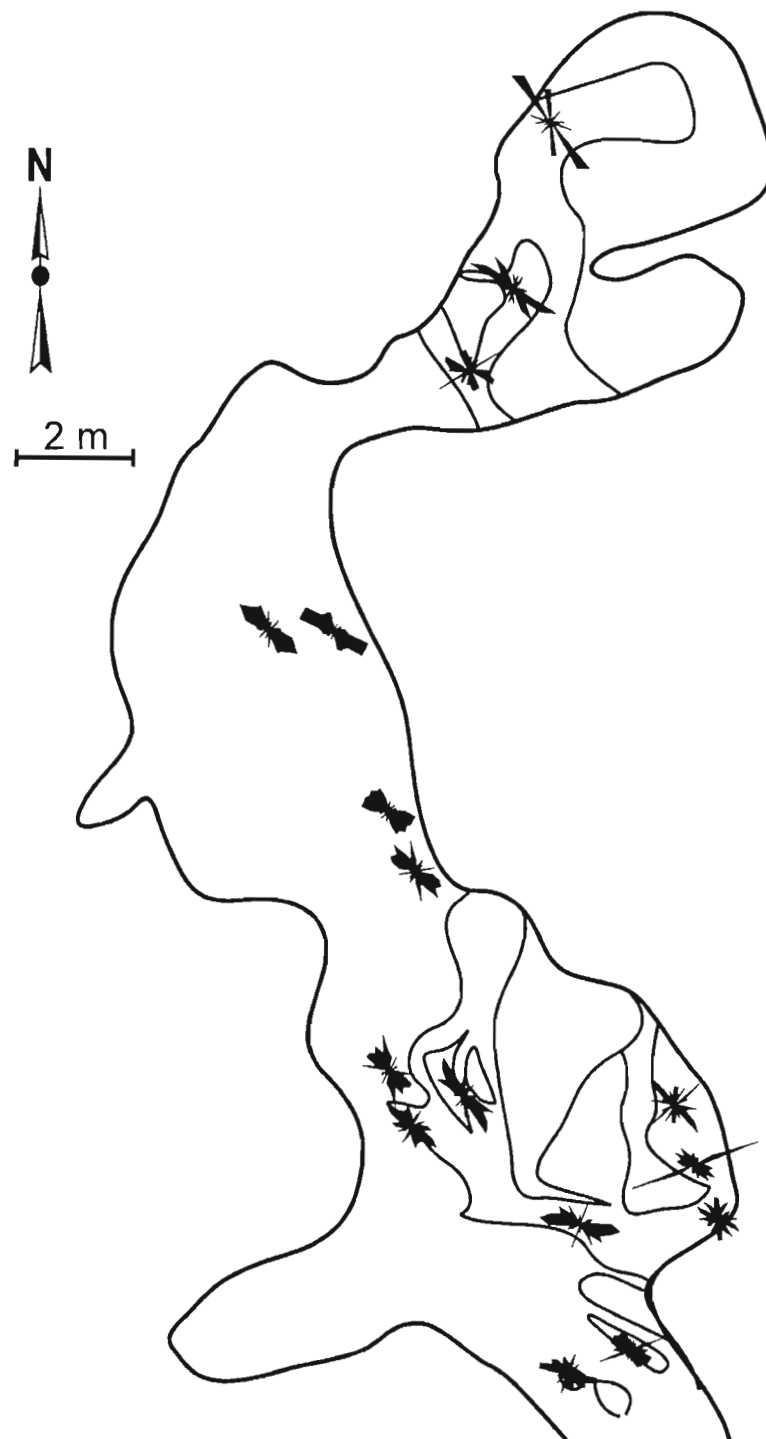


Figure 5.3: Carte des fabriques de la brèche Nord.
L'orientation des fragments sur la brèche Nord montre deux comportements distincts. Une distribution des orientations dans la zone centrale non triée et des orientations ayant tendances à s'aligner sur les orientations des poches de granulométrie différente.

fragments d'une classe granulométrique particulière aurait entraîné des ruptures de pente. L'analyse de la fabrique (figure 5.3) montre clairement que dans cette zone, les fragments s'alignent majoritairement suivant une direction N140 avec une seconde orientation peu marquée à N10.

La géométrie des fragments a été étudiée sur les rainurages RF 45 et RF48. Les distributions des dimensions fractales de bordure (figure 5.4) des fragments de tonalite à gros grains et de tonalite à grains fins sont uni-modales. Elles définissent une unique population comprise entre $Fd^*=1$ et $Fd^*=13$ pour les fragments à gros grains des échantillons RF45 et pour RF48, elles sont comprises entre 2 et 35. les fragments de tonalite à grains fins de l'échantillon RF45 montrent le même type de comportement avec des valeurs comprises entre 2 et 27. Les valeurs obtenues sont élevées et traduisent une forte corrosion des fragments tonalitiques indépendamment de leur faciès porphyrique ou aplitique.

Les distributions granulométriques régulières (Figure 5.2), sans ruptures de pente indiquent que les fragments présents dans cette zone n'ont pas subi de classement. Les orientations de fragments peuvent se résumer à une seule direction très largement majoritaire comprise entre N140 et N150 (Figure 5.3) Cette constance de fabrique marque, elle aussi, l'homogénéité de cette zone et l'absence de tri. Les valeurs élevées des dimensions fractales de bordures indiquent la circulation d'un fluide corrosif, ou un temps de résidence important dans un fluide moins corrosif.

5.2 Les faciès classés

5.2.1 les faciès à poches

Les zones de poches granulométriques mises en évidence par la cartographie minutieuse de l'affleurement se divisent en poches de fragments fins, moyens et gros. La nature des fragments et les proportions de chacun des faciès sont identiques à celles observés dans la zone non classée de la brèche principale. La matrice a la même composition chimique et minéralogique.

Plusieurs carrés de même dimensions que sur la zone non classée ont été analysés selon la même méthode. Les résultats obtenus par l'analyse de la taille des fragments montrent des variations marquées ce qui confirme les observations de terrain. Il est difficile

de caractériser la zone classée en terme de taille des fragments car chacune des poches a ses propres caractéristiques granulométriques. Les courbes granulométriques cumulées sur les fins montrent des tracés chaotiques (Figure 5.2). La distribution granulométrique des fragments au sein de ces zones ne suit plus de loi claire. Un tel comportement montre que ces zones ont subi un tri des fragments en fonction de leur taille. Afin de pouvoir comparer les deux faciès, nous avons calculé la taille moyenne arithmétique des fragments. Ce calcul a été effectué sur 4 carrés pour le faciès classés et sur 9 carrés pour le faciès non classé. La comparaison des courbes granulométriques moyennes de la zone classée et de la zone non classée (figure 5.5) montre une très forte similitude. Cette similitude signifie que la zone de poche suivait la même distribution granulométrique que la zone non classée avant qu'un tri interne des fragments ne s'opère.

Dans les poches granulométriques, les fragments ont une tendance à s'aligner de façon sub-parallèle aux contacts des poches auxquelles ils appartiennent (figure 5.3). Ces contacts sont purement granulométriques, ils se matérialisent par des changements brutaux de la taille des fragments. Les orientations principales observées dans la zone non classée sont toujours présentes mais de façon plus discrète.

Les fabriques de cette zone montrent clairement que les fragments des poches granulométriques s'alignent suivant les directions des contacts des poches. La variabilité de ces directions et donc la variabilité des orientations de fragments implique un transport des fragments au cours duquel les fragments se sont réorientés.

L'étude des dimensions fractales de bordure des fragments de tonalite à gros grains des échantillons RF44 et RF47 provenant des zones classées montre une distribution des F_d^* pluri-modale avec des valeurs comprises entre 2 et 21. Trois populations sont identifiables au sein de l'échantillon RF44 : 2-10, 12-14, 16-19 tandis que l'échantillon RF48 se différencie en deux populations : 2-6 et 13-21 (figure 5.4). Le même type de distribution a été mis en évidence pour les fragments aplitiques de l'échantillon RF48.

5.2.2 laminations

Il existe au sein du corps bréchique principal des zones de matrice laminée (Figure 5.6). La matrice se présente comme une succession de fines couches alternativement noires et grises contournant les fragments de la brèche. Géométriquement, ces laminations se

suivent sur deux mètres à l'affleurement et semblent former deux ensembles parallèles espacés d'une vingtaine de centimètres et symétriques. Cette structure est globalement orientée N100°. L'observation microscopique de ces structures indique que ces laminations sont dues à un tri granulométrique de micro-fragments de quartz entre 25 et 75 microns. Les zones les plus sombres contiennent des fragments de taille inférieure à celles des fragments des zones grises. La minéralogie de ces zones regroupe uniquement ces micro-grains de quartz dans une matrice à tourmaline finement cristallisée. La présence de tourmaline en ciment des micro grains de quartz indique que ces structures ont une origine hydrothermale. Les fragments de quartz sont arrondis et sont issus du broyage de la tonalite lors de la bréchification. Ces grains ont été transportés dans un conduit interne à la brèche par un fluide lors de la phase de transport de la brèche.

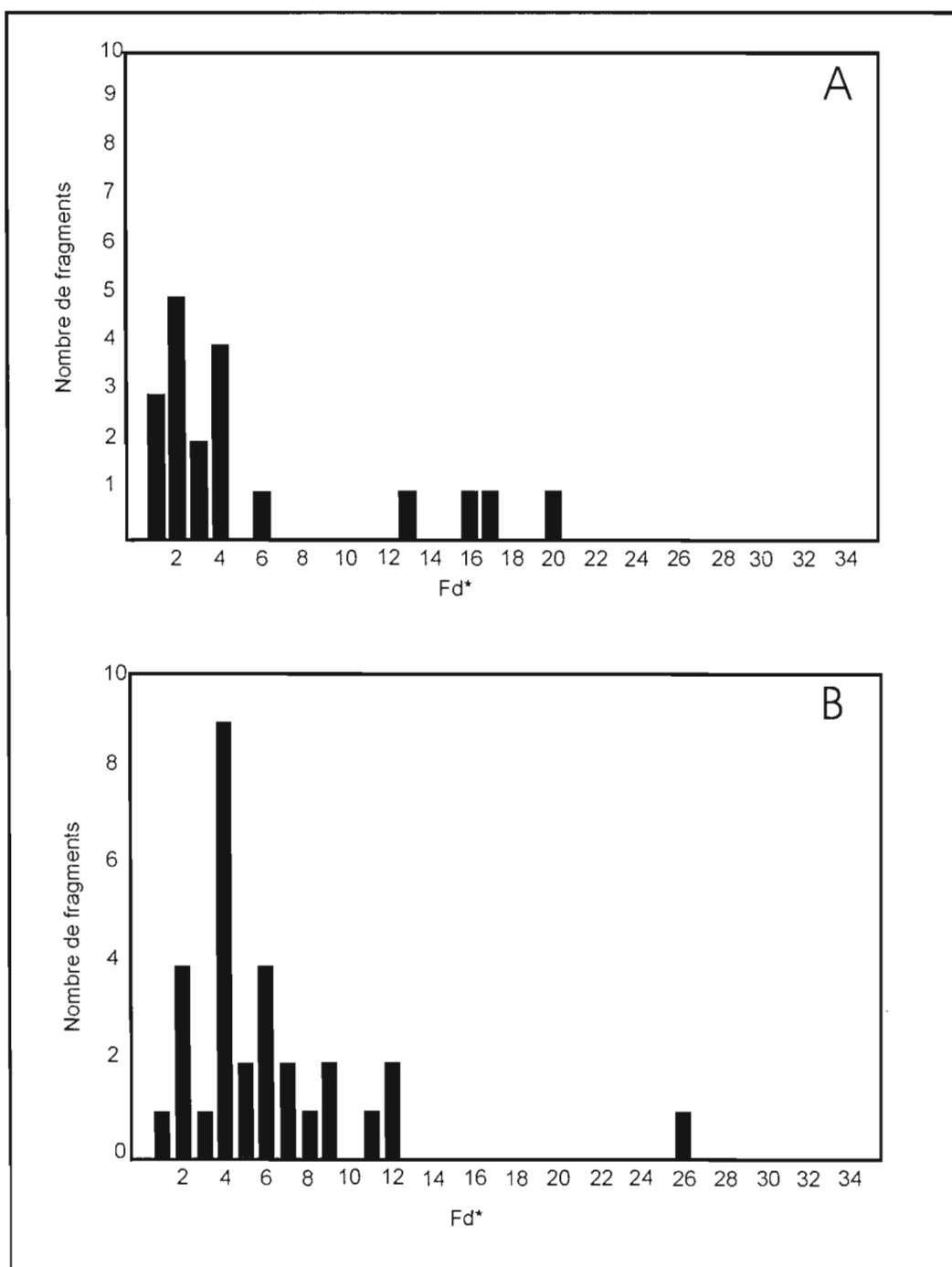


Figure 5.4: Histogramme des distributions des dimensions fractales de bordure des échantillons de la brèche nord. Le Fd^* est la dimension fractale de bordure, plus la valeur de Fd^* est élevée, plus le contour du fragment est complexe. Le graphique A représente un échantillon provenant de la zone classée de la brèche Nord et met en évidence une légère bimodalité des distributions fractales de bordure. Le graphique B provient de la zone non classée de la brèche Nord et montre une distribution des dimensions fractales de bordure plus resserrées.

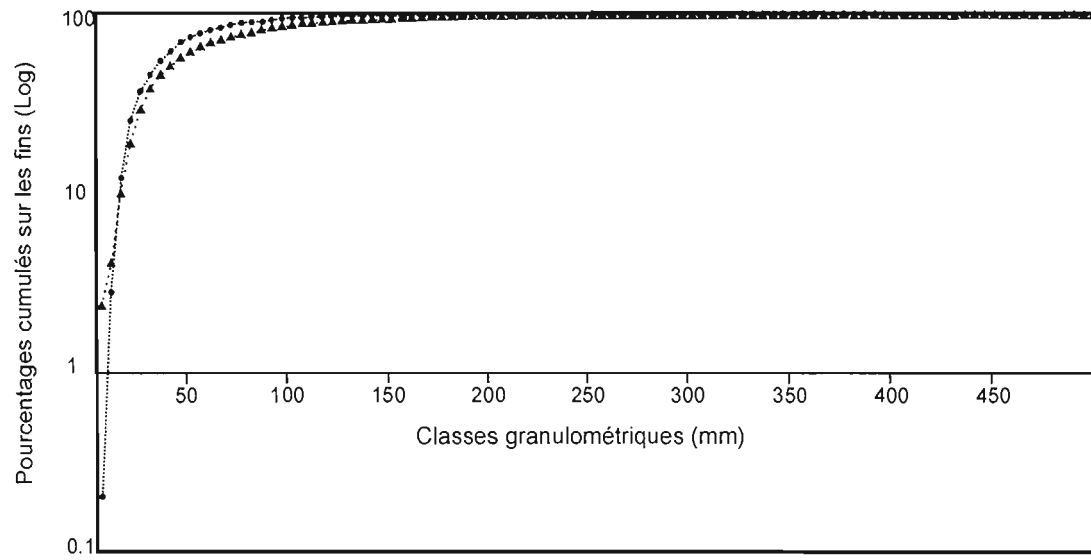


Figure 5.5: Courbes granulométriques cumulées sur les fins moyennes des zones classées (ronds) et non classées (triangles) montrant une très forte similitude dans les distributions granulométriques des fragments de la brèche Nord.

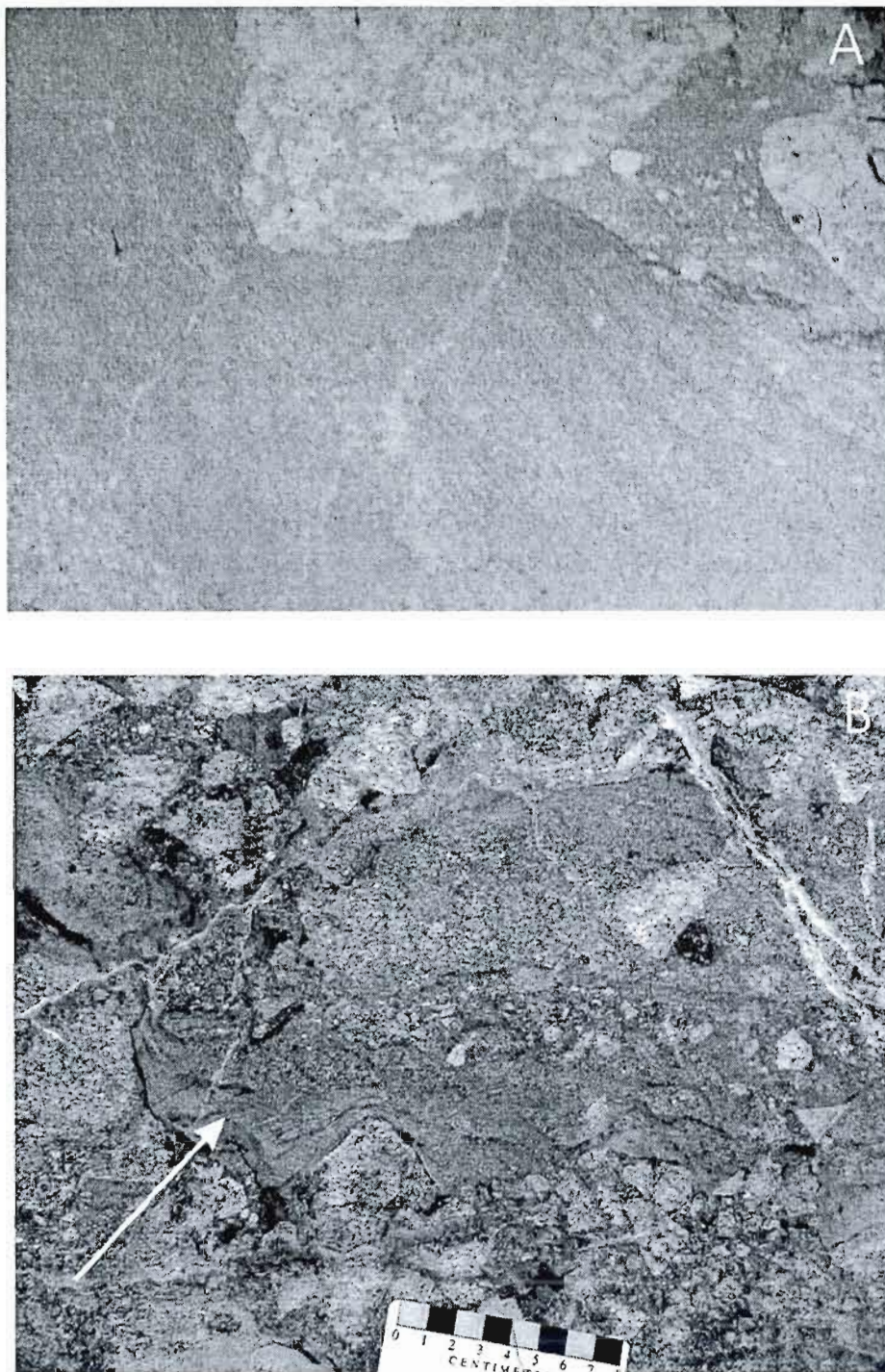


Figure 5.6: Planche photographique des laminassions de la matrice. Le cliché B montre ces laminassions. Il s'agit d'alternance de lits millimétriques de teinte gris clair et noiratre. Le cliché du haut montre ces mêmes laminassions et met en évidence les différences de granulométrie des micrograins de quartz dans ces laminassions.

CHAPITRE VI

GENESE DES BRÈCHES DE QUEYLUS

Les résultats de la caractérisation de l'organisation interne de la brèche implique un épisode de transport au cours duquel un réarrangement des fragments a eu lieu. De plus les altérations hydrothermales présentes dans les brèches amènent aussi une réflexion sur les relations de cette brèche avec le pluton de Chibougama et les autres indices et gisements cuprifères de la région. La partie suivante discute des mécanismes de transport pouvant mener à l'organisation interne observée et proposera un modèle de mise en place de la brèche.

6.1 Relations spatiales

La coexistence de faciès tonalitiques à grains fin et à gros grains chimiquement et minéralogiquement très similaires au sein de la brèche situe celle-ci à l'apex d'une coupole. Le faciès porphyrique occupe la partie inférieure tandis que le sommet de la coupole est constitué de tonalite aplitique. Cette coupole sert d'encaissant aux veines de quartz précoces. Elle est aussi probablement responsable de l'anomalie observée sur le levé magnétique. Les deux brèches Sud et Nord sont encaissées dans la même roche et présentent les mêmes altérations principales i.e phyllique et propylitique. Leurs matrices ont la même composition.

La brèche Sud a, sans conteste, une origine structurale. Elle est générée par la propagation de veinules de tourmaline dans une zone de transtension dans un relais initié par un décrochement dextre. La présence de pyrites précoces à ombre de pression de quartz dans la matrice de la brèche Nord indique que cette matrice a cristallisé sous contraintes. Deux fragments présentent un stockwerk de tourmaline très fin limité aux fragments dans la brèche principale. Ces micro veinules sont à mettre en parallèle avec celles observées dans la brèche sud. Une fracturation plus large a ensuite repris ce stockwerk. Ces deux brèches présentent des points communs importants.

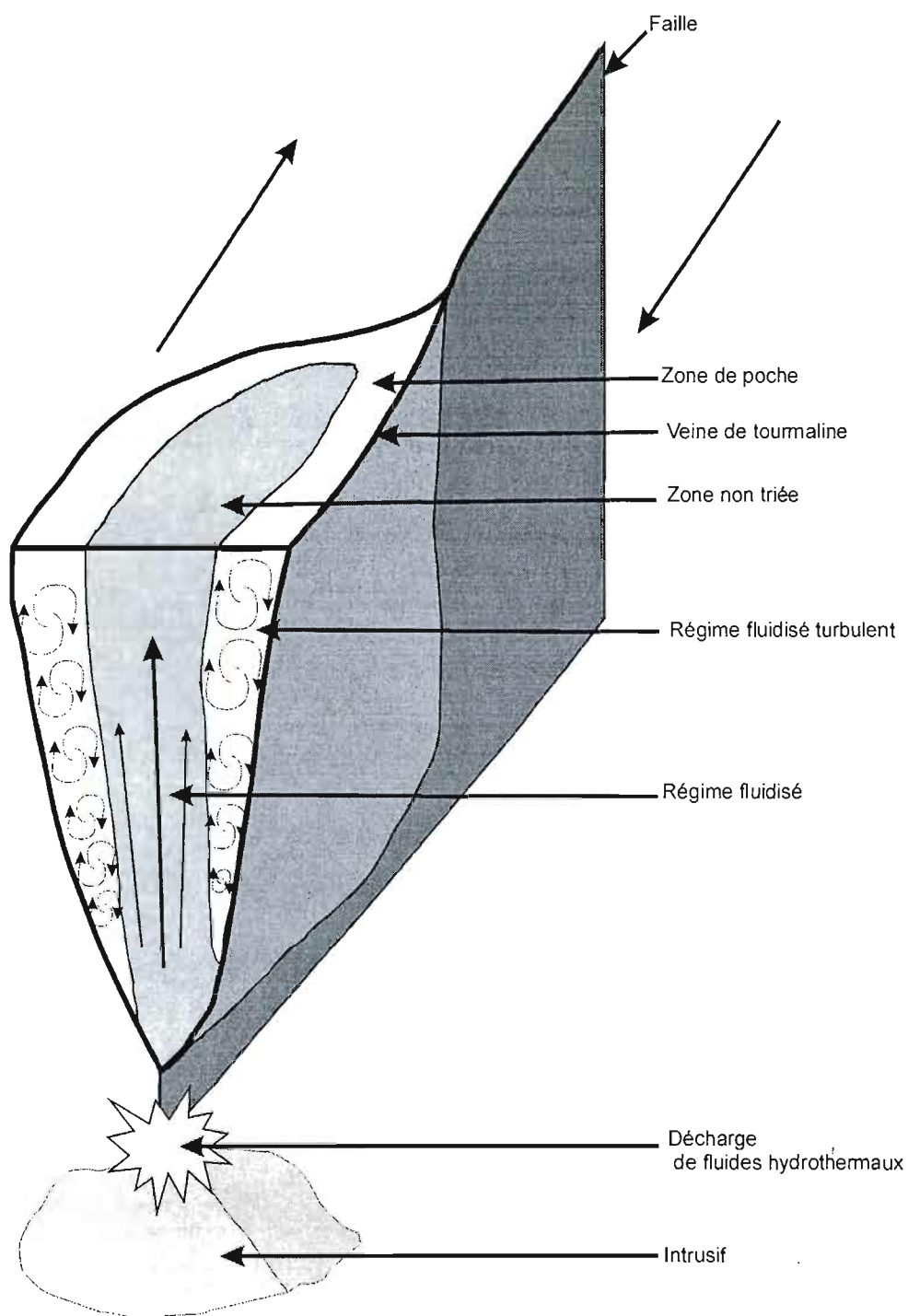


Figure 6.1: Schéma synthétique de mise en place des brèches de Queylus

Cependant la brèche Nord présente de nombreuses évidences de transport absentes sur la brèche Sud ce qui explique la différence d'aspect entre les deux affleurements. Les études menées sur la brèche principale permettent de caractériser avec précision les zones classées et non classées. La zone non classée se caractérise par une orientation franche des fragments suivant une direction N150.

La zone de poche présente un fort contraste avec la zone non classée. Les évidences de transport y sont nombreuses : variabilité de composition des fragments, réorientation des fragments, et tri granulométrique. Les fragments et les matrices des deux zones sont identiques et aucune structure faillée ne marque le passage d'une zone à l'autre. De plus la compilation des données granulométriques de cette zone classée permet de tracer une courbe granulométrique cumulée sur les fins similaire à celle obtenue pour la zone non classée. (Figure 5.5) Cette observation permet de considérer que la zone classée est uniquement due à une ségrégation interne des fragments suivant leur taille à partir d'une zone identique à la zone classée.

6.1 Relations temporelles

Les fragments tonalitiques des deux faciès présentent une forte altération phyllique à muscovite très fine et pyrite. Les cristaux de feldspaths des fragments sont systématiquement séricitisés, et sont très souvent difficilement identifiables. Cette altération est cartographiée régionalement sur une zone d'environ 10 km. (Racicot, 1980) La matrice de la brèche contient, elle aussi, une importante quantité de ces muscovites à tendance phengitique. On y retrouve aussi des cristaux de pyrite associés. Ces observations permettent de considérer l'altération phyllique antérieure à la bréchification.

La mise en place de la coupole tonalitique s'accompagne de deux phénomènes :

- I) D'abord une fracturation permet la mise en place d'un réseau de veines de quartz
- II) et ensuite une phase d'altération de type phyllique.

Ces deux étapes précoces n'ont aucun rapport avec la bréchification. Il s'agit de deux épisodes tardifs de la mise en place de la phase tonalitique encaissante des brèches de Queylus.

L'altération propylitique qui se développe conjointement à la bréchification. Il s'agit principalement des phases constitutrices de la matrice de la brèche. Cette paragenèse est clairement contemporaine de la bréchification. Elle se retrouve dans les fractures de la brèche Sud qui isolent les fragments et dans la matrice de la brèche principale. De plus elle n'est localisée que sur les affleurements bréchiques. Suite à cette altération hydrothermale syn-bréchification, des veines de calcite, magnétite pyrite chalcopryrite et des veines de magnétite seule mettent en place et recoupent la brèche.

Les affleurements étudiés permettent de retracer l'évolution de la brèche dans le temps. Les structures rencontrées dans la veine massive de tourmaline de la zone Sud montrent un schéma de Riedel montrant un mouvement dextre des veines de tourmaline. La zone de brèche sud correspond au développement d'une zone en relais entre deux veine de tourmaline. Cette zone de relais se caractérise par le développement de veinules de tourmaline délimitant des fragments de tonalite. Au sein de cette structure les deux faciès de brèche illustrent deux états de maturité de la brèche. Le faciès in situ est une brèche du même type que celle développée dans le cisaillement. Le second faciès plus riche en matrice correspond à la même brèche mais dans un état d'évolution légèrement plus avancé. La quantité de matrice est plus importante. On reconnaît encore localement des veines de tourmaline mais celle ci sont plus ouvertes que dans le faciès in situ. De plus, dans la matrice à tourmaline, on retrouve une quantité plus importantes de poussière de roche que dans le faciès in situ où les veinules responsables de la bréchification ne contiennent que peu de poussière de roche. L'ouverture plus importante et l'apparition de poussière de roche apparaissent compatible avec une évolution plus avancée de ce faciès de brèche; le développement du relais de manière dextre entraîne la création d'espaces que les veinules accommodent. La contrainte cisailante provoque des frictions entre les fragments accentuées par les jeux cisailant des veinules développées dans la zone de transtension ce qui produit de la poussière de roche. Un tel système est responsable de la formation de la brèche de Queylus.

La brèche principale poursuit son évolution. Les évidences de transport des fragments sont nombreuses. L'organisation de la brèche principale en zones classées et zones non classées n'est pas primaire. Une réorganisation des fragments nécessite un transport des fragments.

Suite au transport et au classement des fragments, un dernier épisode filonien à quartz recoupe la brèche. Une phase d'altération supergène affecte ensuite la brèche.

6.2 Modèle génétique de la brèche

L'organisation interne de la brèche principale implique un transport de la brèche au cours duquel se produit un tri granulométrique des fragments. Peu de systèmes hydrothermaux présentent de telles caractéristiques. Des organisations granoclassées se rencontrent dans certaines brèches de gisements épithermaux (Genna et al, 1995) ou dans les sédiments internes des brèches de collapse. (Lorilleux et al, 2002) Or, l'organisation en poches granulométriques de la brèche de Queylus n'est pas de ce type. Les fragments se regroupent en poches de fragments de taille comparable et les passages d'une poche granulométrique à l'autre sont francs, sans augmentation ou diminution des tailles des fragments. Un tel tri des fragments peut avoir une origine gravitaire ou être du à une fluidisation de la brèche.

Certaines brèches de diatrèmes présentent des classements de fragments. (Junqueira-Brod et al, 2005; Boorman et al, 2003) Le tri granulométrique des fragments dans ce type de brèche est attribué à une fluidisation de la brèche. (McCallum, 1985; Boorman et al, 2003; Junqueira-Brod et al, 2005)

La fluidisation est une propriété physique importante des matériaux granulaires. Quand un matériel granulaire subit une pression de fluide dépassant une vitesse minimale, dite vitesse minimale de fluidisation, les particules granulaires qui le compose s'affranchissent de leur poids et des forces de friction inter granulaires pour s'isoler les unes des autres. Elles atteignent l'état de fluidisation et auront peu de mouvements relatifs les unes par rapport aux autres. L'effet immédiat est que le corps granulaire acquiert le comportement d'un fluide. Il peut alors remonter dans un conduit. Si la vitesse des fluides devient supérieure à une vitesse critique, des bulles se forment dans le système (McCallum, 1985) et ces bulles peuvent entraîner des fragments dans leur remontée et remobiliser des particules. Ceci est valable pour les corps granulaires de granulométrie homogène. Dans le cas de particules aux dimensions variables, l'état de fluidisation est plus difficile à atteindre, il ne se fait pas dans toutes les parties du corps granulaire au même moment. De manière générale, les particules les plus fines atteignent l'état de fluidisation avant les plus grosses et

les bulles se forment plus rapidement et en plus grand nombre facilitant le tri granulométrique des fragments.

La description détaillée de l'organisation interne de la brèche principale a permis de mettre en évidence différents paramètres pouvant s'insérer dans un contexte de fluidisation de la brèche. La séparation de la brèche en une zone non classée et en une classée issue de la réorganisation interne d'une zone initialement non classée correspond aux différents comportements observés lors de la fluidisation de matériel granulaire granulométriquement hétérogène. Les fragments situés dans la zone centrale ont été transportés à l'état de fluidisation probablement sans formation de bulles ce qui explique l'homogénéité granulométrique et de fabrique. Les fragments des zones classées ont subi une pression de fluides à une vitesse dépassant la vitesse critique ce qui a entraîné la formation de bulles et la ségrégation granulométrique. Les laminations de la matrice sont l'expression fluidisation des fines se réinjectant dans la brèche. (Mc Callum, 1985) La bimodalité des distributions fractales observées dans les zones classées trouve son origine dans l'attrition des fragments lors du transport dans un médium perturbé par la formation des bulles.

Dans le modèle de fluidisation des breccia pipes, la pression de fluide nécessaire au transport des fragments provient d'une explosion phréato-magmatique ou de la libération de fluides hydrothermaux lors de la rétraction du granite sous-jacent. (Northon et Cathles, 1973) Ce mécanisme apparaît plausible dans un district porphyrique comme celui de Chibougamau. Cependant, les observations de terrain montrent clairement que les brèches de Queylus sont d'origine structurale. Plusieurs auteurs ont utilisé la fluidisation des brèches dans des failles ou sous pression de fluide. (Branquet et al, 1999; Clark et James, 2003) ou par fluidisation acoustique (Melosh, 1996; Sornette et Sornette, 2000) ou l'énergie nécessaire au passage à l'état fluidisé est fournie par une onde acoustique d'origine sismique. Elle n'est cependant qu'appliquée qu'aux gouges de faille.

Les différents faciès précédemment décrits sont des étapes d'un même type de brèche à différents stades d'évolution. L'initiation de la brèche se fait dans une structure en relais dextre. La bréchification se fait à la fois sous l'action du cisaillement et de la pression de fluide. Le cisaillement évolue ensuite vers une structure bréchique en transtension. La bréchification est largement contrôlée par les contraintes qui se développent dans la zone de relais et par les fluides. Des cisaillements dextres se développent et des fluides

hydrothermaux y circulent, donnant naissance aux veines de tourmaline massives. Le jeu dextre de ces fractures développe des zones de transtension dans le relais facilitant la formation de cisaillements secondaires. Les fluides assistent l'ouverture de ces fractures amenant la formation d'une brèche. Ce mécanisme a pour effet de créer une zone de perméabilité entraînant le drainage des fluides hydrothermaux. Cependant, une surpression de fluide se développe au sein de cette structure. Sa libération entraîne le transport à l'état de fluidisation de la brèche et le tri granulométrique. (Figure 6.1) La chute de pression qui s'en suit engendre la cristallisation des phases hydrothermales de la matrice. Il est fortement probable que la relaxation de la pression de fluide s'accompagne d'une fracturation plus large que celle responsable de la bréchification. La présence de veinules de magnétite et de calcite+quartz+magnétite+sulfure tardives par rapport à la bréchification mais génétiquement reliées à la phase d'altération propylitique dans l'encaissant aux abords immédiats de la brèche va dans ce sens. La décompression des fluides provoque, outre le transport de la brèche, une fracturation de son encaissant dans lequel les derniers fluides hydrothermaux s'infiltrèrent.

CONCLUSIONS

Les brèches sud et nord de Queylus permettent de mettre en évidence l'évolution temporelle de ce système bréchique. Les brèches méridionales présentant les stades précoces tandis que les brèches nord sont des stades matures. Les brèches nord et sud sont issues du même événement. L'initiation de la bréchification se fait dans une zone de relais en transtension. Cette bréchification crée une zone de perméabilité et draine les fluides. Dans le cas de la brèche sud, le mécanisme s'est arrêté à ce stade tandis que dans la brèche nord, une surpression de fluide s'est développée. Cette surpression est responsable du transport des fragments. La présence de poches granulométriques dans le corps bréchique ne peut s'accorder avec un transport balistique dans lequel le tri des fragments suivant leurs tailles est impossible. De plus nos observations de géométrie des fragments, de distribution granulométrique, de fabrique ainsi que la présence de rubanements dans la matrice apparaissent comme des indices de poids d'un transport par fluidisation. Les failles responsables de la bréchification ont alors permis la canalisation des fluides lors de leur dépressurisation. Les conditions pour un transport des fragments en régime fluidisé était alors présente. Les bordures de la structure ont subi un régime fluidisé turbulent, provoquant la réorganisation des fragments tandis que la partie centrale, en régime fluidisé non turbulent n'a pas subi ce tri.

La présence d'une telle brèche dans un contexte porphyrique impose aussi quelques réflexions. Les altérations propylitiques observées ainsi que sa position au-dessus d'un intrusif lui accorde des liens avec les breccia-pipes. Cependant, dans le cas des brèches de Queylus il apparaît que les modèles de breccia pipe formés par rétraction du pluton sous-jacent ou par une surpression de fluide hydrothermaux au toit de l'intrusif ne sont pas concluants. Les brèches de Queylus montrent clairement que des breccia-pipes peuvent se développer dans des zones de transtension et que le principal mécanisme de bréchification est structural. Le transport des fragments est quant à lui assuré par les fluides hydrothermaux.

RÉFÉRENCES

- An, L. J. and Sammis, C. G., 1994, Particle size distribution of cataclastic fault materials from Southern California: *Pageoph*, v. 143, p. 203-227.
- Anonyme, lever magnétique aéroporté du Québec et du Labrador: Commission Géologique du Canada
- Bennett, J. G., 1936, Broken Coal: *J. Inst. Fuel*, v. 10, p. 22-39.
- Billi, A., Storti, F., and Salvini, F., 2003, Particle size distribution of fault rocks and fault transpression: are they related?: *Terra Nova*, v. 15, p. 61-66.
- Boorman, S. L., McGuire, J. B., Boudreau, A. E., and Kruger, F. J., 2003, Fluid overpressure in layered intrusions: formation of a breccia pipe in the Eastern Bushveld, Republic of South Africa: *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 356-369.
- Branquet, Y., Cheilletz, A., Giuliani, G., Maumonier, B., and Blanco, O., 1999, Fluidized hydrothermal breccia in dilatant faults during thrusting: the Colombian emerald deposits: *Geological Society of London*, v. 155, p. 183-195.
- Bureau, S., 1981., Zones de brèches associées à des gîtes de porphyres cuprifères dans la région de Chibougamau, Chibougamau, Québec. MSc thesis Université du Québec A Chicoutimi.
- Bérubé, D. and Jébrak, M., 1999, High precision boundary fractal analysis for shape characterization: *Computers and Geosciences*, v. 25, p. 1059-1071.
- Cathelineau, M., 1988, Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature: *Clay Minerals*, v. 23, p. 471-485.
- Cathelineau, M. and Nieva D., 1985, A chlorite solid solution geothermometer, The Los Azufres (Mexico) geothermal system: *Contrib Mineral Petrol*, v. 91, p. 235-244.
- Cladouhos, T. T., 1999, Shape preferred orientations of survivor grains in fault gouge: *Journal of Structural Geology*, v. 21, p. 419-436.
- Clark, C. and James, P., 2003, Hydrothermal brecciation due to fluid pressure fluctuations: examples from the Olary Domain, South Australia: *Tectonophysics*, v. 366, p. 187-206.
- Condie, K. C., 2005, TTGs and adakites: are they both slab melts?: *Lithos*, v. 80, p. 33-44.
- Duquette, G., 1970, Stratigraphie de l'Archéen et relations métallogéniques dans la région de Chibougamau. Ministère des Richesses Naturelles, Québec; Etude Spéciale No. 8, 18p

- Frimmel, H. E., 1997, Chlorite thermometry in the Witwatersrand basin: constraints on the paleoproterozoic geotherm in the Kaapvaal craton: *Journal of Geology*, v. 105, p. 601-615.
- Gaboury, J., 1995, Rapport géologique, propriété Queylus. Exploration Loubel Inc. Ministère des Ressources Naturelles du Québec. GM53969
- Gaudin, A. M. and Meloy, T. R., 1962, Model of a comminution distribution equation for single fracture: *Transactions of American Institute of Mining Engineering*, v. 223, p. 40-43.
- Genna, A., Jébrak, M., Marcoux, E., and Milési, J. P., 1996, Genesis of cockade breccias in the tectonic evolution of the Cirotan epithermal gold system, West Java: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 33, p. 93-102.
- Jowett, E. C. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. 16. 1991. GAC/MAC/SEG joint meeting, program with abstracts.
- Junqueira-Brod, T. C., Gaspar, J. C., Brod, J. A., and Kafino, C. V., 2005, Kamafugitic diatremes: their textures and field relationships with examples from the Goiás alkaline province, Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*.
- Jébrak, M., 1997, Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: a review of mechanisms, morphology and size distribution: *Ore Geology Reviews*, v. 12.
- Jébrak, M. and Doucet, P., 2002, Geology and gold-molybdenum porphyry mineralization of the Archean Taschereau-Launay plutons, Abitibi, Quebec.: *Precambrian Research*, v. 115, p. 329-348.
- Jébrak, M., Harnois, L., Carrier, A., and Laurence, J., 1995, Don Rouyn: An Archean gold porphyry: *Precambrian' 95 Livret-guide de l'excursion*, v. A1103.
- Kirkham, R. V. and Sinclair, W. D., 1996, Gîtes filoniens de cuivre; dans *Géologie des types de gîtes minéraux du Canada*, Commission Géologique du Canada: vol. 8, p. 441-451.
- Kolmogorov, A. N., 1941, On the log-normal distribution of particles sizes during break-up process: v. XXXI, p. 99-101.
- Kranidiotis, P. and McLean, W. H., 1987, Systematics of chloride alteration at the Phelps Dodge massive sulphide deposit, Matagami, Québec: *Economic Geology*, v. 82, p. 1898-1911.
- Krogh, T. E., 1982, Improved accuracy of U-Pb zircon ages by the creation of more concordant systems using air abrasion technique: *Geochemica and Cosmochemica Acta*, v. 46, p. 637-649.
- Lienau, C. C., 1936, *J. Franklin. Inst.*, v. 221, p. 485.
- Lin, A., Shimamoto, T., Maruyama, T., Sigetomi, M., Miyata, T., Takemura, K., Tanaka, H., Uda, S., and Murata, A., 2001, Comparative study of cataclastic rocks from a drill

- core and outcrops of the Nojima Fault zone on Awaji Island, Japan: *The Island Arc*, v. 10, p. 368-380.
- Lorenz V., (1985) Maars and diatremes of phreatomagmatic origin: a review. *South African Journal of Geology*;88(2):469-470.
- Lorilleux, G., Jébrak, M., Cuney, M., and Baudemont, D., 2002, Polyphase hydrothermal breccias associated with unconformity-related uranium mineralization (Canada): from fractal analysis to structural significance: *Journal of Structural Geology*, v. 24, p. 323-338.
- Marone, C. and Scholtz, C. H., 1989, Particle-size distribution, microstructure within simulated fault gouge: *Journal of Structural Geology*, v. 11, p. 799-814.
- McCallum, M. E., 1985, Experimental evidence for fluidization processes in breccia pipe formation: *Economic Geology*, v. 80, p. 1523-1543.
- Melosh, H. J., 1996, Dynamical weakening of faults by acoustic fluidization: *Nature*, v. 379, p. 601-606.
- Miller, R. J. M., 1961, Wall-rock alteration at the Cedar Bay Mine, Chibougamau District, Quebec: *Economic Geology*, v. 56, p. 321-330.
- Monzawa, N. and Otsuki, K., 2003, Comminution and fluidization of granular fault materials: implication for fault slip behaviour: *Tectonophysics*, v. 367, p. 127-143.
- Mortensen, J. K., 1993, U-Pb geochronology of the eastern Abitibi subprovince. Part I: Chibougamau-Matagami-Joutel region: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 30, p. 11-28.
- Norton, D. L. and Cathles, L. M., 1973, Breccia pipe-Products of exsolved vapor from magmas: *Economic Geology*, v. 68, p. 540-546.
- Pilote P., 1996, Géologie et métallogénie du district minier de Chapais-Chibougamau, DV98-03. Québec: Ministère des ressources naturelles du Québec.
- Racicot, D., 1980, Géochimie et métallogénie de la partie orientale du pluton de Chibougamau. Ministère des Ressources Naturelles du Québec, DPV 758
- Racicot, D., 1981, Géochimie et métallogénie des parties occidentale et centrale du pluton de Chibougamau. Ministère des Ressources Naturelles du Québec, DPV 834
- Ross, P. S. and Jébrak, M., 2002, Discharge of hydrothermal fluids from a magma chamber and concomitant formation of a stratified breccia zone at the Questa porphyry molybdenum deposit, New Mexico: *Economic Geology*, v. 97, p. 1679-1699.
- Sammis, C. G. and Biegel, R. L., 1989, Fractal, fault gouge, friction: *Pure and Applied Geophysics*, v. 131, p. 255-271.

- Samms, C. G., King, G., and Biegel, R., 1987, The kinematics of gouge deformation: Pure and Applied Geophysics, v. 125, p. 777-812.
- Saotome, A., Yoshinaka, R., Osada, M., and Sugiyama, H., 2002, Constituent material properties and clast-size distribution of volcanic breccia: Engineering Geology, v. 64, p. 1-17.
- Sornette, D. and Sornette, A., 2000, Acoustic Fluidization for Earthquakes? : Bulletin of the Seismical Society of America, v. 90, p. 781-785.
- Wolfe, J. A., 1980, Fluidization versus phreatomagmatic explosions in breccia pipe: Economic Geology, v. 75, p. 1105-1111.
- Wyman, D. A., 2003, Upper mantle processes beneath the 2.7 Ga, Abitibi belt, Canada: a trace element perspective: Precambrian Research, v127, Issues 1-3, p 143-165

ANNEXE 1

Méthodologie

L'analyse fractale des fragments de la brèche a pour but de déterminer le degré de corrosion des fragments de la brèche de manière quantitative. Pour se faire, nous avons utilisé la méthode proposée par Bérubé et Jébrak (1999) qui permet d'attribuer à chaque fragment une valeur appelée dimension fractale de bordure et représentant le degré de complexité de son contour. Ainsi les fragments faiblement corrodés auront des dimensions fractales proches de 1 tandis que les fragments très corrodés, aux formes très complexes auront des dimensions fractales de bordures proches de 2.

Le calcul des dimensions fractales de bordure a été effectué sur des sections sciées qui ont été scannées à haute résolution. Les images ont été traitées sous Illustrator et les fragments redessinés un à un. Pour chacun des échantillons, plusieurs fichiers ont été établis en fonction de la nature pétrologique des fragments en séparant les fragments de quartz des fragments de tonalite à gros grain et des fragments de tonalite à grain fin. Les clastes de méladiorite et de magnétite ont été écartés du fait de leur faible nombre. Les fichiers obtenus sont exportés vers le logiciel NIH image 1.62 qui après binarisation de l'image effectue le calcul de dimension fractale de bordure. Les résultats se présentent sous la forme d'un graphe de Richardson (Log de la surface/ Log du contour). La dimension fractale s'obtient par le calcul de la pente de la droite obtenue. Pour des raisons pratiques, les dimensions fractales de bordure F_d sont exprimées sous la forme F_d^* où $F_d^* = (F_d - 1) \cdot 100$.

L'étude granulométrique a été menée sur les fragments tonalitiques par traitement d'image. Des photographies systématiques des affleurements ont été réalisées suivant un maillage métrique en affectant un numéro à chacun des carrés ainsi obtenu. Les clichés ont ensuite été traités sous Corel Draw et Corel Photo-Paint afin de corriger la déformation angulaire, puis exportés vers Illustrator où les fragments ont été redessinés. Nous avons traité ensemble les différents faciès tonalitiques. Les fragments de quartz ont été écartés de l'étude du fait de leur faible nombre. Les fichiers obtenus sous Illustrator ont ensuite été exportés NIH Image 1.62 et binarisés. La longueur de l'axe principal de chaque fragment et son orientation ont ensuite été mesurés en deux dimensions (dimension apparentes et non absolue).

La résolution des photographies ne permet pas toujours d'isoler tous les fragments de petite taille, ce qui a pour effet de sous estimer la quantité des fractions les plus fines. De plus l'observation des matrices au microscope a montré que celle ci contient une forte proportion de poussière de roche qui représente la fraction la plus fine des fragments. Nous devons considérer que notre intervalle de validité se situe entre 5mm et 1m.

L'étude des fabriques a été également réalisée à partir de photographies systématiques. Les orientations des axes majeurs apparents ont été mesurées, soit l'intersection du fragment avec la surface d'affleurement. Cette méthode de mesure introduit une certaine marge d'erreur difficilement quantifiable car la disposition réelle des fragments n'est pas connue dans les 3 dimensions. Ceci provoque aussi pour certains fragments peu allongés une confusion entre l'axe majeur et l'axe mineur. Une telle confusion entraîne une bimodalité des orientations artificielles où deux familles distinctes espacées de 90 degrés ne forment en réalité qu'une seule famille.

carres	6	27	41	38	4	14	15	17	19	24	26	37	41	51	65	73	81
classe	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs	effectifs
5	19	0	1	0	0	1	11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	12	1	0	1	4	6	5	2	0	0	12	0	0	0	0
15	1	7	35	7	1	10	24	14	5	10	0	1	35	1	1	0	2
20	8	24	29	25	2	5	27	20	0	29	2	6	29	6	3	0	5
25	13	35	23	24	4	6	21	8	1	36	3	5	23	10	10	0	11
30	18	25	18	14	6	6	19	9	1	29	9	5	18	7	7	0	4
35	17	14	15	19	10	8	8	6	2	17	6	6	15	7	5	0	2
40	16	18	10	14	2	0	4	14	1	10	4	7	10	5	3	1	4
45	15	18	17	13	7	3	4	2	1	17	6	6	17	5	2	1	4
50	19	8	4	14	8	0	3	3	4	13	5	3	4	5	2	3	2
55	11	12	3	6	0	0	6	4	5	7	3	4	3	2	2	5	1
60	10	10	2	10	3	2	3	2	2	5	4	1	2	5	2	0	0
65	8	4	3	11	6	1	1	2	4	5	3	2	3	1	0	3	1
70	5	6	3	4	3	2	1	1	8	4	1	2	3	0	0	5	0
75	8	4	3	4	0	0	0	0	4	5	1	3	3	0	1	3	0
80	5	5	1	4	0	1	3	2	6	3	2	1	1	0	0	5	1
85	3	5	1	3	0	2	0	0	11	2	1	2	1	2	1	2	0
90	1	1	2	4	0	1	3	0	8	2	0	3	2	3	0	0	0
95	3	4	0	0	1	1	4	0	4	1	0	0	0	1	0	4	1
100	1	2	0	0	1	0	0	0	6	3	0	2	0	0	0	1	1
105	4	1	0	1	2	1	1	2	6	2	0	0	0	0	0	1	0
110	2	1	1	2	0	0	1	1	1	0	2	1	1	1	0	1	0
115	2	1	1	1	0	2	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
120	0	0	1	3	0	3	1	0	2	2	0	0	1	0	0	1	0
125	0	1	0	0	0	1	0	0	4	1	1	0	0	0	0	2	1
130	0	1	1	1	1	0	0	0	2	1	1	1	1	0	0	2	0
135	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
140	1	1	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	1	0
145	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
150	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	1	0	0	0	0	1	0
155	0	0	1	0	0	0	1	0	2	1	0	0	1	1	0	1	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	1	0
165	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	1	0
170	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
175	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
180	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
185	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
190	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
195	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
205	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
210	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0

ANNEXE 2
Données granulométriques

215	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
220	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
225	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
230	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
235	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
245	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
255	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
265	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
270	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
275	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
280	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
285	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
290	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
295	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
305	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
315	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
320	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
325	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
335	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
345	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
350	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
355	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
370	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
380	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
385	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
390	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
395	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
405	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
415	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
420	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
425	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
430	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ANNEXE 3 Orientations des fragments

	carré 4	carré 14	carré 6	carré 15	carré 17	carré 24	carré 26	carré 27	carré 37	carré 38	carré 41	carré 65	carré 73	carré 81	carré 19	carré 51
0	2	4	8	4	8	9	4	9	3	4	4	2	3	5	8	4
10	1	4	5	6	4	8	3	5	1	7	2	2	2	0	2	1
20	5	2	7	6	6	16	0	9	2	3	5	0	3	1	4	2
30	0	4	5	5	7	8	3	14	3	3	1	2	1	1	2	1
40	0	0	6	4	1	4	1	4	2	4	0	2	3	2	5	0
50	0	7	4	2	4	11	0	1	2	7	4	1	2	0	2	3
60	2	3	8	12	5	7	2	7	0	0	6	5	1	0	1	2
70	3	3	23	47	4	6	2	11	1	6	5	1	0	1	1	0
80	2	0	7	5	4	9	0	6	4	6	8	1	1	0	1	2
90	7	1	13	9	7	6	1	13	0	12	9	3	2	2	4	3
100	9	5	10	13	4	23	6	16	4	20	11	3	3	1	4	3
110	7	3	16	10	7	24	3	10	6	19	26	4	2	3	5	6
120	5	3	16	16	9	15	6	19	7	19	26	4	11	1	12	7
130	6	6	16	10	3	17	6	26	6	17	26	0	8	1	9	9
140	3	8	14	15	8	14	5	17	8	19	15	1	4	9	13	7
150	5	2	14	7	6	8	6	14	4	16	14	3	8	8	16	6
160	1	3	13	8	4	13	4	14	3	17	14	3	5	0	5	6
170	1	2	8	9	8	13	8	17	7	10	13	3	0	5	5	2
180	2	4	8	4	8	9	4	9	3	4	4	2	3	5	8	4
190	1	4	5	6	4	8	3	5	1	7	2	2	2	0	2	1
200	5	2	7	6	6	16	0	9	2	3	5	0	3	1	4	2
210	0	4	5	5	7	8	3	14	3	3	1	2	1	1	2	1
220	0	0	6	4	1	4	1	4	2	4	0	2	3	2	5	0
230	0	7	4	2	4	11	0	1	2	7	4	1	2	0	2	3
240	2	3	8	12	5	7	2	7	0	0	6	5	1	0	1	2
250	3	3	23	47	4	6	2	11	1	6	5	1	0	1	1	0
260	2	0	7	5	4	9	0	6	4	6	8	1	1	0	1	2
270	7	1	13	9	7	6	1	13	0	12	9	3	2	2	4	3
280	9	5	10	13	4	23	6	16	4	20	11	3	3	1	4	3
290	7	3	16	10	7	24	3	10	6	19	26	4	2	3	5	6
300	5	3	16	16	9	15	6	19	7	19	26	4	11	1	12	7
310	6	6	16	10	3	17	6	26	6	17	26	0	8	1	9	9
320	3	8	14	15	8	14	5	17	8	19	15	1	4	9	13	7
330	5	2	14	7	6	8	6	14	4	16	14	3	8	8	16	6
340	1	3	13	8	4	13	4	14	3	17	14	3	5	0	5	6
350	1	2	8	9	8	13	8	17	7	10	13	3	0	5	5	2